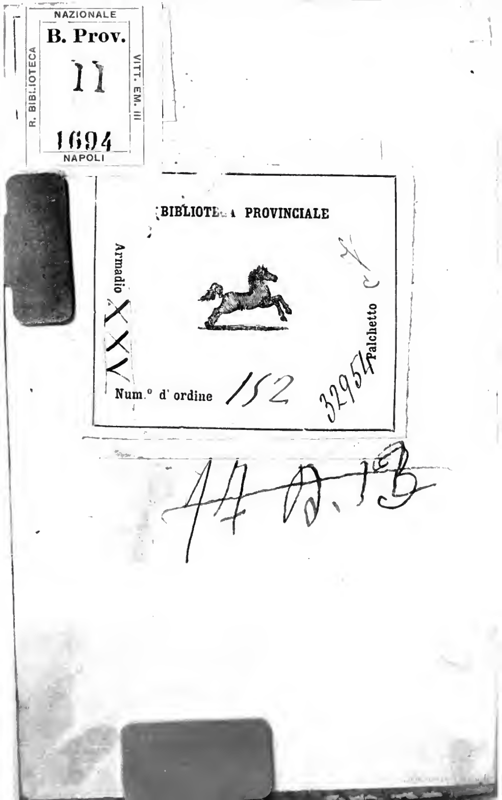

VITTORIO EM. III



TRAITÉ PRATIQUE

SUR LES

CHEMINS EN FER.

On trouve chez le même Libraire les ouvrages suivans du même Auteur.

PRINCIPES DE L'ART DE CHAUFFER ET D'AÉRER LES ÉDIFICES PUBLICS, LES MAISONS D'HABITATION, les Manufactures, les Hôpitaux, les Serres, etc., et de construire les Foyers, les Chaudières, les Appareils pour la vapeur, les Grilles, les Étuves, démontrés par le Calcul et appliqués à la Pratique; suivis de Remarques sur la nature de la Chaleur et de la Lumière, et plusieurs Tables utiles dans la Pratique; traduits de l'anglais sur la deuxième édition, par T. Duverne; 1 vol. in-8°, avec planches.

ESSAI PRATIQUE SUR LA FORCE DU FER DE FONTE ET D'AUTRES MÉTAUX, destiné à l'usage des Ingénieurs, des Maîtres de forges, des Architectes, des Fondeurs, et de tous ceux qui s'occupent de la construction des Machines, des Bâtimens, etc., contenant des Règles pratiques, des Tables et des Exemples; le tout fondé sur une suite d'expériences nouvelles, et une Table étendue des propriétés de divers matériaux, etc.; traduit de l'anglais sur la deuxième édition, par T. Duverne, 1 vol. in-8° avec Planches; 1825.

IMPRIMERIE DE HUZARD-COURCIER,
Rue du Jardinet, n° 12

TRAITÉ PRATIQUE

SUR LES

CHEMINS EN FER

ET SUR LES

VOITURES DESTINÉES A LES PARCOURIR.

PRINCIPES d'après lesquels on peut évaluer leur force, leurs proportions et la dépense annuelle qu'ils nécessitent, ainsi que leur produit ; conditions à remplir pour les rendre à la fois utiles, économiques et durables. Théorie des chariots à vapeur, des machines stationnaires et de celles où l'on emploie le gaz ; leur effet utile et les frais qu'elles occasionent.

ORNÉ DE PLANCHES, ET CONTENANT BEAUCOUP DE TABLES.

PAR TH. TREDGOLD,
Ingénieur civil, Membre de l'Institut des Ingénieurs, etc.

TRADUIT DE L'ANGLAIS
PAR T. DUVERNE,
Ancien Officier de la Marine royale, Chevalier de l'ordre de Saint-Louis.

PARIS,
BACHELIER (SUCCESSEUR DE Mme Ve COURCIER),
LIBRAIRE POUR LES SCIENCES,
QUAI DES AUGUSTINS, N° 55.

1826





TABLE

DES MATIÈRES.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

AVERTISSEMENT

DU TRADUCTEUR.

L'idée que nous prenons des choses par les mots dont on se sert pour les désigner, est souvent fort différente de celle qu'on avait l'intention de nous en donner. Cela peut arriver surtout dans l'explication des inventions nouvelles, dont les noms, et ceux de leurs parties, se tirent le plus ordinairement de quelque rapport de ressemblance ou d'utilité avec des objets déjà connus.

En entendant, pour la première fois, parler d'une route à ornières de fer, on est naturellement porté à croire qu'il s'agit d'un chemin dont la voie se compose de pièces de fer ayant des rebords comme des ornières, que les roues des voitures s'y emboîtent, et y roulent, retenues par les

rebords. Un chemin en fer ou à ornières de fer, au contraire, est le plus souvent composé d'un double rang de barres parallèles, posées sur des blocs de pierres qui les soutiennent à une certaine élévation au-dessus du sol: les deux rangs de barres sont écartés de la largeur de la voie d'une voiture, et c'est sur eux que portent les roues; elles y sont retenues par des rebords fixés de chaque côté de leur circonférence, qu'ils dépassent d'une quantité déterminée. Dans la réalité, c'est la roue qui fait ornière, et la voie en fer s'y place comme en menuiserie une languette se place dans une rainure. Cependant, en Angleterre, où l'on a fait les premiers chemins en fer, on en construit aussi dont les barres qui forment les deux côtés de la voie sont garnies d'un rebord pour retenir les roues des voitures, et ces roues ont dans ce cas leur circonférence unie comme celle des voitures qui roulent sur une route ordinaire; mais ces chemins, que les Anglais nomment *chemins à voie plate*, parce que le fond de l'ornière sur lequel porte la roue ne fait pas saillie, sont à la fois plus chers à établir et plus exposés à être dégradés que les autres, de sorte qu'on n'en établit guère que pour des besoins temporaires.

En adoptant, dans la traduction d'un ouvrage spé-

cial sur ces sortes de chemins, les noms déjà consacrés par les écrivains français, en petit nombre, qui se sont occupés de ce nouveau système de routes, nous avons cru nécessaire d'expliquer la signification précise qu'on doit leur donner, afin de prémunir nos lecteurs contre les fausses idées qu'ils auraient pu prendre si nous leur avions laissé croire que les mots dont nous nous servions étaient des équivalens bien exacts de ceux que nous avions à traduire dans notre langue.

L'idée de faire porter les roues des voitures sur des surfaces dures et polies, afin de diminuer la résistance à la force qui les met en mouvement, est loin d'être nouvelle; mais celle d'employer le fer à former ces surfaces n'a pu naître, et n'a pu surtout être mise à exécution que dans un pays riche, et où l'importance des transports était assez grande pour engager les spéculateurs dans des dépenses aussi considérables que celles que exige une entreprise de cette nature. Il n'est donc pas surprenant que ce soit en Angleterre qu'on ait construit les premiers chemins en fer. Bornés d'abord au service particulier des mines de houille, l'économie et les autres avantages qu'on y a trouvés en ont bientôt étendu l'usage aux autres mines, aux carrières et aux usines; et de-

puis quelques années, l'opinion générale des Anglais s'est tellement prononcée en leur faveur, qu'on a vu des associations se former pour établir des routes de cette espèce dans toutes les parties de la Grande-Bretagne, et pour tous les genres de service, et y placer assez de capitaux pour être en état de couvrir d'ornières de fer plus de 200 myriamètres d'étendue de chemin.

Cependant l'établissement de ces routes ne s'est pas fait sans opposition, non par suite de ces préjugés qui, dans d'autres pays, résistent ordinairement avec succès à toute innovation, quelle qu'en puisse être l'utilité, mais à raison d'un sentiment plus puissant en Angleterre que les préjugés, celui des intérêts particuliers qu'il froisse.

Les entrepreneurs des canaux ont senti que les chemins en fer offraient un moyen de transport dont la concurrence ne pouvait que leur être très défavorable; beaucoup de propriétaires ont aussi considéré la cession des terrains nécessaires à la formation de ces chemins, comme un trouble et un dommage pour eux. Des voix, en assez grand nombre, se sont élevées dans les deux chambres du parlement, contre les demandes faites par les compagnies des autorisations légales qui leur étaient nécessaires,

mais elles ont été impuissantes, et l'intérêt du pays l'a emporté sur celui de quelques particuliers.

Le nouveau système de route, qui déjà concourt, dans la Grande-Bretagne, avec les canaux et les chemins ordinaires, pour faciliter les communications intérieures, n'a pu manquer d'attirer l'attention de tous ceux qui, par état ou autrement, s'occupent, en France, des améliorations qu'on pourrait y faire. Beaucoup de personnes en reconnaissent les avantages. Cependant, il n'a encore été entrepris dans le royaume que le seul chemin en fer destiné au transport des charbons de terre qui se tirent des mines du territoire de Saint-Étienne. L'ordonnance du Roi qui en autorise l'établissement est du 25 février 1823. Les travaux pour la construction sont en pleine activité. Madame la Dauphine, dans le voyage qu'elle vient de faire, a voulu les visiter, et l'approbation qu'elle leur a hautement donnée est un juste motif pour faire espérer que les entreprises de la même nature seront encouragées par le gouvernement.

Un projet bien plus vaste, et d'une tout autre importance que celui qui s'exécute près de Saint-Étienne, est soumis depuis plus d'un an à l'approbation du gouvernement; c'est celui de la

construction, entre Paris et le Havre, d'un chemin en fer à double voie, pour le transport des marchandises de toute espèce. La compagnie qui propose de l'entreprendre offre toute la sûreté, toutes les garanties désirables; et si, jusqu'à ce jour, aucune décision n'a encore été prise, c'est très vraisemblablement parce que ce projet se trouve en concurrence avec celui d'un canal maritime de Paris au Havre, qui a également des soumissionnaires riches et recommandables, et dont l'idée, toute gigantesque qu'elle paraît, et peut-être par la raison même qu'elle est gigantesque, semble plus propre encore à flatter l'esprit national.

Ceux qui, sans être indifférens à la gloire de leur pays, sont accoutumés à ne juger du mérite des choses que par leur utilité réelle, seront sûrement bien aises de trouver dans le nouvel ouvrage de M. Tredgold, dont nous publions la traduction, les données nécessaires pour les mettre en état de comparer les deux systèmes rivaux, celui de canalisation et celui des routes en fer. Elles ont été utiles à M. Navier, ingénieur en chef des ponts et chaussées, qui les a puisées dans l'ouvrage original, pour la rédaction d'un excellent mémoire lu par lui, le 1er de mai de cette année, à l'Institut, dont il est membre; mémoire dans

lequel il appuie, par des calculs où la dépense nous paraît plutôt exagérée qu'atténuée, et par des raisonnemens qui nous paraissent aussi justes qu'ils sont présentés avec mesure, le projet de chemin en fer de Paris au Havre (*). Nous partageons l'opinion de cet habile ingénieur sur la facilité d'exécution de ce chemin en fer, sur l'utilité dont il serait, et sur les bénéfices qu'en retireraient les entrepreneurs. Nous sommes en outre très portés à croire que l'établissement d'un chemin en fer n'est point du tout incompatible avec l'existence d'un canal maritime, et que si la concurrence avait l'effet de diminuer les profits de chacune des entreprises, il leur en resterait encore d'assez considérables avec un état de commerce déjà si vaste, et qui tend tous les jours à s'augmenter. Mais si, contre notre idée, il était démontré que l'une des entreprises dût nécessairement exclure l'autre, alors nous ferions des vœux pour qu'on adoptât de préférence celle qui combinerait le mieux les avantages de l'économie dans les frais de construction, de la modération dans les droits, de la sûreté, de la célérité des trans-

(*) *De l'établissement d'un chemin de fer entre Paris et le Havre*, etc. 1826.

ports en toutes saisons et par tous les temps, quelles que fussent la nature et la quantité des marchandises.

Dans tous les ouvrages de M. Tredgold, le calcul et le raisonnement tendent toujours à prémunir ses lecteurs contre ces idées de résultats exagérés que l'enthousiasme ou l'intérêt personnel cherchent si souvent à nous faire adopter, quand il s'agit d'inventions nouvelles. Ainsi, quoiqu'il ne puisse pas ignorer qu'on a fait des expériences dans lesquelles des voitures ont été traînées sur des chemins en fer avec une vitesse de vingt et même de vingt-quatre kilomètres par heure, il veut que l'on considère comme très rapide une vitesse de 16 kilomètres à l'heure, quel que soit le moteur que l'on emploie sur ces chemins. Jusqu'à présent on n'y a fait servir que les chevaux et les machines à vapeur, soit stationnaires, soit locomotives. Un Anglais, M. Brown, ayant imaginé de substituer des machines à gaz aux machines à vapeur, M. Tredgold a consacré quelques pages de cet ouvrage (*voyez* page 124) à l'examen de cette invention, et ses calculs l'ont conduit à penser qu'elle n'aurait pas le succès que s'en promet son auteur. Cependant, depuis la publication du Traité de M. Tredgold, il a été fait une expérience publique de la machine de

Brown, et si l'on s'en rapporte au compte qu'en ont rendu les feuilles périodiques, elle a complètement réussi. Mais comme les objections de M. Tredgold portent principalement sur la trop grande dépense qu'entraînerait l'usage du gaz, il est possible qu'elles subsistent dans toute leur force, malgré le succès de l'expérience dont nous parlons.

Nous avons réduit en mesures et en poids métriques, les tables qui terminent ce Traité, et toutes les fois que nous l'avons cru utile, nous avons, dans le cours de l'ouvrage, mis à côté des valeurs anglaises que nous rapportions, leur équivalent dans notre pays. Cependant, nous ne croyons pas inutile d'avertir ici que :

1°. Le mille anglais est de 5280 pieds anglais, le pied de 0,304799 mètre, et que par conséquent le mille équivaut à 1609,33 mètres.

2°. La livre avoir du poids est égale à 0,4535 kilogramme.

3°. Le tonneau anglais est de 20 quintaux de 112 livres, ou de 2240 livres avoir du poids, équivalant à 1016 kilogrammes, ou à un peu plus de 1 tonneau de France.

4°. La livre sterling vaut 25 francs de notre monnaie, et se divise en 20 shellings; ainsi le shelling vaut 1 franc 25 centimes.

5°. Le shelling se divise en 12 pences, et chaque penny en 4 farthings, ce qui donne, pour la valeur du penny, 10,4 centimes, et pour celle du farthing 2,6 centimes.

PRÉFACE

DE L'AUTEUR.

Tout moyen pratique de transport doit offrir un certain degré d'intérêt dans un pays commerçant; et si chaque système était l'objet d'un examen approfondi et de comparaisons avec d'autres systèmes analogues; si les avantages particuliers de chacun, et les limites qui en restreignent l'application, étaient pris en considération, le résultat de ces recherches, utile en tout temps, le serait surtout quand il se trouverait une surabondance de capitaux qui pourraient être avantageusement employés à l'amélioration des communications intérieures d'un pays.

C'est dans le but de remplir cet objet, du moins en ce qui concerne les routes

à ornières de fer, que j'ai entrepris ce petit Traité. J'espère y faire voir, d'une manière plus claire qu'on ne l'a fait jusqu'ici, les cas où les canaux peuvent être plus avantageux, ceux où les grandes routes ordinaires offrent plus d'économie, et enfin l'objet réel et l'économie du système intermédiaire de transport, au moyen des routes à ornières.

J'avais besoin, pour servir de base à mes calculs, de données qui nécessitaient des expériences faites sur une échelle assez étendue pour me permettre d'écarter toute circonstance étrangère au sujet, afin d'obtenir des résultats peu éloignés du terme moyen que doit donner la pratique; car ceux qui l'auraient pu ont négligé, jusqu'à présent, de faire connaître l'effet moyen déduit d'un travail fait en grand, et pendant un temps considérable. Connaissant toute l'incertitude des expériences faites à l'aide du dynamomètre, et sachant que celui qui fait des essais doit avoir à sa disposition une

force invariable, et pouvoir souvent répéter et comparer les expériences de différentes manières, jusqu'à ce qu'il soit bien certain d'être arrivé à la mesure véritable des quantités qu'il se propose de constater; sachant aussi que ces conditions ne sont pas faciles à remplir dans des expériences publiques où celui qui les dirige se trouve exposé à des interruptions extraordinaires; j'entrepris une série d'expériences sur une échelle suffisante pour établir les faits auxquels je voulais arriver, sans me dissimuler cependant qu'ils l'eussent été avec plus d'avantage si l'échelle avait été plus vaste et les expériences plus variées dans leurs détails. Le lecteur voudra bien se souvenir que ces expériences lui sont présentées par quelqu'un qui les a faites seul et sans aide, et qui n'aurait jamais pu composer ce Traité s'il ne leur avait pas consacré des heures qu'on donne ordinairement au repos.

Indépendamment des questions relatives aux chemins à ornières en fer, sujet

de recherches utiles, j'en examine ici plusieurs autres, ainsi qu'on le verra par ce que je dis de la théorie des machines mues par le gaz, et par les recherches que je fais connaître sur la nature, la puissance et les propriétés des machines à vapeur. On aurait pu croire que toutes les recherches de ce genre avaient été faites, et qu'elles devaient être, depuis long-temps, dans les mains de tous ceux qu'intéressent ces premiers moteurs, si puissans et si économiques des machines; mais bien loin que cela soit, il est, au contraire, douteux qu'on ait encore fait quelque chose d'important relativement à la théorie de la machine à vapeur; et très certainement rien n'a été publié à cet égard qui ne soit plus propre à égarer qu'à aider ceux qui cherchent à la rendre parfaite. La théorie de l'expansion de la vapeur, si souvent citée, et qui est l'ouvrage commun de M. Watt et du docteur Robison, néglige les circonstances mêmes qui en limitent l'application dans la pratique.

Le rapport des parties, quelque essentiel qu'il soit pour rendre parfaite l'action de la machine à vapeur, n'est pourtant encore établi que sur des données fournies par des essais multipliés; et personne ne paraît avoir cherché à constater les proportions qui produiraient un maximum d'effet d'après des conditions données. Et ce ne sont pas seulement les recherches théoriques qui manquent, nous sommes égalemeut privés de faits et d'observations. La chaleur spécifique de la vapeur à différens états n'a pas été déterminée, de sorte qu'on n'a pas encore les données qui auraient pu modérer les idées extravagantes qu'on a propagées dans ces derniers temps sur les avantages de la vapeur à haute pression. On voudrait presque faire croire qu'elles ne méritent pas l'attention des savans de ce pays, et que la seule chose qui puisse désormais satisfaire leur enthousiasme, c'est de trouver le moyen d'escalader les cieux. Mais si les savans ne sentent pas le prix des recherches dont nous parlons, il

n'en est pas de même des autres classes, et chacun s'y trouve heureux de vivre à une époque où l'on peut jouir des avantages qui résultent de l'invention de la machine à vapeur. Sa puissance, la facilité avec laquelle elle se prête à nos besoins, l'importance dont elle est pour la prospérité du pays, sont reconnues de tout le monde. Cependant si j'éprouve un sentiment d'orgueil en pensant que cette machine a été inventée en Angleterre, je ne puis, en même temps, m'empêcher de regretter que le génie d'un Anglais n'en ait pas encore développé les principes.

TRAITÉ PRATIQUE

SUR

LES CHEMINS EN FER

ET SUR LES

VOITURES DESTINÉES A LES PARCOURIR.

CHAPITRE Ier.

Nature des chemins à ornières de fer. — Avantages des communications intérieures. — Des routes chez les Romains. — Comparaison des avantages offerts par les grandes routes, les chemins à ornières et les canaux. — Routes à ornières déjà existantes en Angleterre, en Écosse et dans le pays de Galles.

Le principal objet de la construction d'un chemin à ornières de fer ou d'autre matière, est de former des surfaces dures, unies et d'une longue durée, sur lesquelles puissent tourner avec facilité les roues des voitures. Ces surfaces se composent de barres ou ornières de fer élevées à quelque distance

du niveau du sol, placées parallèlement et séparées par un chemin couvert de gravier; de sorte qu'une route à ornières réunit l'avantage d'un passage commode pour la marche des chevaux, à celui de placer les roues sur des surfaces à la fois solides et unies. Les roues des chariots faits pour ces sortes de chemins sont retenues sur les barres par des rebords qui leur servent de guides, et leur circonférence est dure et partout unie. La figure 1 représente un chemin à double ornière sur lequel sont placés des chariots; une portion de la route est supposée enlevée, afin d'en faire voir la construction. (*Voir* la description de la planche.)

En voyant avec quelle facilité le chariot le plus lourd peut être mis en mouvement sur un chemin ainsi construit, on ne peut qu'être étonné de ce qu'un moyen si simple, si puissant et si économique ne soit pas plus généralement employé. L'idée de faire rouler les voitures sur des surfaces polies n'est pas nouvelle, mais un cheval n'y tire pas avec facilité; c'est pour cette raison qu'à Florence, où la partie du pavé qui porte les roues est en marbre dur et poli, celle sur laquelle marchent les chevaux est faite en pierre commune.

Il y a déjà long-temps qu'on a appris en Angleterre à tirer un parti semblable de l'emploi des

ornières de bois pour porter les roues des chariots; plus nouvellement, on s'est servi de fer coulé, dont on a trouvé l'usage plus avantageux, car cette matière est beaucoup plus dure et plus durable que le marbre même sur lequel les Italiens font porter les roues de leurs voitures.

On obtient avec le fer une surface dure, égale, polie, dont la dépense est comparativement peu considérable, et où la force motrice n'a guère d'autre résistance à vaincre que le frottement de l'essieu. Un chariot qu'on y fait rouler a la plus grande analogie avec un corps que l'on pousse sur de la glace unie : on sait que l'on peut avec une très petite force donner à celui-ci une immense vitesse; et si le poli de la glace l'emporte sur celui du fer, cet avantage se trouve compensé par l'usage des roues. L'effet de la résistance de l'air, et la loi d'augmentation de frottement sont les mêmes dans les deux cas. Les grands avantages des chemins à ornières de fer avaient été entrevus par le Dr Young, et la Notice qu'il en a donnée, il y a déjà plusieurs années, se termine par ces mots remarquables (*) : « Il est possible que les routes pavées en fer soient employées par la suite pour rendre les voyages plus expéditifs, car elles ne présentent

(*) *Young's Nat. Phil.*, vol. I, pag. 219; 1807.

presque aucune autre résistance à surmonter que celle de l'air, et des chemins de cette espèce permettraient d'augmenter indéfiniment la vitesse. »

En examinant les avantages des chemins à ornières de fer, nous devons comparer ces chemins avec les grandes routes ordinaires et avec les canaux de navigation. Un chemin en fer a toute la sûreté d'une grande route et offre une économie des sept huitièmes sur la force motrice, un seul cheval produisant sur un chemin de cette espèce autant d'effet que huit chevaux sur une route ordinaire. Lorsque l'effet moyen produit par une force donnée n'est porté qu'à environ trois milles (4800 mètres) par heure, un chemin à ornières tient à peu près le milieu entre une route ordinaire et un canal; mais si l'on voulait que les transports se fissent avec une plus grande vitesse, une route à ornières aurait un effet égal et même supérieur à celui d'un canal.

La certitude et la prompte expédition sont d'une telle importance dans le commerce, qu'une légère augmentation de dépense ne mérite pas d'être prise en considération.

La certitude d'être approvisionné doit tendre beaucoup à diminuer la fluctuation dans les prix, et à faire cesser les alternatives de sur-

abondance et de disette qui arrivent continuellement dans les marchés, par suite de vents contraires, de gelées, de débordemens, etc. Tout ce qui tend à assurer le transport des marchandises doit les rendre moins chères pour les consommateurs, parce qu'alors on n'a pas besoin d'employer autant de capitaux en approvisionnemens et en magasins pour les contenir. Avec un bon système de transports, dès que des demandes extraordinaires ont lieu, tous les capitaux du pays peuvent s'utiliser. Il est même assez probable que les motifs qui engagent à présent la population à s'accumuler dans les grandes villes, deviendront moins puissans à mesure que la facilité et la certitude des communications augmenteront.

Ces remarques n'ont de rapport qu'à l'état actuel du commerce; son extension et les moyens d'en économiser les dépenses en Angleterre sont d'une bien plus grande importance. Nous devons toujours nous considérer comme étant en rivalité avec les autres nations; et tout ce qui peut nous mettre en état d'approvisionner nos marchés et ceux de l'étranger à un prix plus bas et en fournissant des objets de qualité supérieure, ajoute nécessairement à la prospérité et à la richesse du pays.

L'amélioration des moyens de communications intérieures ne peut que produire beaucoup de bien, en facilitant l'accès des marchés aux produits de l'agriculture des cantons que la nature a le plus favorisés, et en égalisant ainsi la distribution de ces produits. Dans tout pays d'une grande étendue, il y a nécessairement une très grande différence dans la nature des terrains, et il est très peu probable que les meilleures terres soient celles qui se trouvent le plus favorablement placées pour qu'on puisse tirer un bon parti de leurs produits sans le secours de moyens artificiels pour les faire arriver aux lieux où on peut trouver à les vendre. Il est évident qu'à moins d'avoir recours à quelque mode facile de transport, les approvisionnemens se tireront à plus grands frais des terrains de qualité inférieure, ou peut-être de terres dont la culture exige de grands capitaux, sans que le propriétaire en retire plus de produits, et sans qu'il ait même autant de certitude d'en retirer assez pour se rembourser de ses avances et en obtenir l'intérêt ordinaire.

Indépendamment de l'avantage de rendre accessible à toutes les parties de la population les produits des districts les plus fertiles, et cela à des prix raisonnables, un mode de transport économique et régulier a celui d'ouvrir de nouveaux

débouchés à d'autres articles; il crée de nouvelles sources d'échanges et de consommation, favorise, étend le travail et l'industrie, et chasse la paresse et l'insouciance, qui s'enracinent si facilement partout où le peuple, dépourvu de ces moyens, ne peut se procurer que les choses les plus absolument nécessaires à l'existence. Les transports ordinaires par terre et par chariot rendent tellement chers les objets dont le poids est considérable, que les habitans des districts intérieurs sont réduits à se contenter de ce que leur accorde la nature. Dans beaucoup de cantons, le combustible manque presque entièrement; et si les habitans peuvent s'y procurer sans beaucoup de travail le peu de ressources qu'ils offrent, ils n'en obtiendraient guère plus, quelque peine qu'ils prissent pour cela. De là résulte cet état de langueur et d'indifférence si ordinaire dans les contrées ainsi placées.

Sans doute la construction des routes, des canaux et des chemins en fer est un objet dispendieux; mais en la dirigeant convenablement, elle permettrait de donner beaucoup de travail à la classe la plus pauvre, et servirait à soulager ces mêmes paroisses destinées à tirer par la suite tous les avantages de ces moyens de communication. La plus grande partie des opérations relatives à

la construction d'un chemin à ornières de fer peut, avec avantage, être donnée à l'entreprise, et est de nature à ce que tout individu puisse y être employé.

La construction de bons chemins publics était considérée par les anciens Romains comme un objet d'une si grande importance, que toutes les villes principales de leur vaste empire étaient liées par des routes bien supérieures à celles qu'on a faites depuis eux, et d'une construction beaucoup plus chère que celle de nos meilleurs chemins en fer. Ces routes étaient si solidement faites que quinze siècles de dégradations n'ont pu les détruire entièrement. Elles rendaient les communications entre les provinces les plus éloignées faciles en tous temps, et rapides, quand les circonstances l'exigeaient. Elles allaient presqu'en ligne droite d'une ville à l'autre, et elles ont toujours été un objet d'étonnement et d'admiration universelle. Les obstacles naturels, les montagnes, les rivières, les lacs, les marais, tout était écarté, surmonté à force d'art ou de travail. Dans les pays plats, le milieu de la route était élevé en terrasse et dominait la contrée. Elle était composée de plusieurs lits de pierre et de gravier mêlés dans d'excellent ciment, et la surface était pavée. Le pavé était en général fait en pierres; près de Rome, il était de

marbre, et dans quelques parties on y employait de la lave dure, formée en polygones irréguliers et si exactement joints, que Palladio pense qu'on a dû se servir de feuilles de plomb comme moules pour prendre les angles et les contours, afin de les assembler. Dans les pays de montagnes, les routes étaient alternativement coupées dans la montagne et élevées dans le vallon, de manière à conserver le niveau, ou à ménager une pente uniforme, suivant que cela pouvait être plus convenable. Quand le fond du sol n'était pas solide, ils y établissaient des massifs de maçonnerie, et soutenaient la route par de fortes murailles des deux côtés, ou par des arches et des piles quand il fallait élever le chemin.

Les routes des Romains étaient beaucoup plus étroites que les nôtres; la largeur de la chaussée pour les voitures était fixée à 8 pieds romains (moins de 2 $\frac{1}{2}$ mètres); mais leurs chariots étaient aussi moins larges que les nôtres, et la voie de leurs roues n'avait que 10 $\frac{1}{2}$ décimètres (*). Le pavé de leurs grandes routes militaires avait plus de largeur; il était de près de 6 mètres, avec un chemin non pavé à droite et à gauche, séparé de la chaussée par un trottoir d'environ [illegible]6 milli-

(*) Rondelet, *Art de bâtir*, tom. I, pag. 360.

mètres : de sorte que la largeur totale des principales routes militaires ne dépassait pas 12 à 13 mètres. L'épaisseur des matériaux était d'un peu moins d'un mètre, et ils étaient construits avec la plus grande solidité.

Vingt-neuf routes militaires partaient de Rome, et quelques-unes s'étendaient jusqu'aux extrémités de l'empire. Suivant Rondelet, leur ensemble était de 52,964 milles romains, ou de près de 15,500 lieues de 25 au degré.

A Rome, la construction des routes était une affaire toute politique; mais en Angleterre elle intéresse surtout le commerce, auquel elles offrent l'avantage d'un système de communications sûres et rapides, ouvertes à toutes les denrées qu'on veut vendre ou échanger: et comme on doit chercher à faire jouir les sujets d'un même état de facilités pour le commerce aussi égales pour tous que la nature des choses peut le permettre, tous les moyens de communication intérieure doivent être encouragés, et ils doivent être surtout employés dans chaque canton qui a assez d'importance par les produits de son agriculture, de ses mines ou de ses manufactures, pour rendre ces communications profitables à l'état.

Jusqu'ici les canaux ont été le principal moyen qu'on a employé pour faciliter le commerce inté-

rieur; et ils présentent tant d'avantages lorsqu'il s'agit du transport de marchandises fort lourdes, qu'il n'y a guère plus de trois ou quatre ans que l'idée de se servir d'autres moyens pour cet objet a commencé à occuper les esprits. Dans ce moment les communications par le moyen des chemins en fer sont un objet dont on s'occupe beaucoup; et c'est dans le but de faire connaître leur construction, leur usage et les moyens qu'il faudrait adopter pour les améliorer, que j'ai composé cet ouvrage.

Jusqu'à présent les chemins à ornières n'ont été employés avec succès que pour le transport des produits des mines à des distances bornées, et lorsqu'il s'agissait de quantités très considérables: dans le petit nombre de cas où on a voulu les faire servir aux besoins généraux du commerce, ils n'ont pas répondu aux espérances de ceux qui les avaient entrepris; mais ce manque de succès paraît venir entièrement de ce qu'on s'est trop attaché à suivre exactement les modèles adoptés pour le transport des produits des mines, le mode suivi pour la construction et le service de ces derniers chemins ne convenant nullement au but général du commerce.

Si l'on se propose de comparer les chemins à ornières avec les canaux ou avec les routes ordi-

naires, on sent d'avance que chaque mode a ses particularités, comme cela arrive pour toute autre chose. Ce sont donc ces particularités qu'il importe de bien connaître, et nous allons essayer de les rassembler avec concision, afin qu'on puisse mieux les comparer.

Il est nécessaire d'établir avant tout que dans chaque mode de communication on doit chercher à combiner l'économie, la promptitude, la sûreté, la certitude et la commodité. Il faut aussi faire attention à ce qu'exige particulièrement chaque genre de communication.

Un canal a besoin d'eau pour l'entretenir; il faut connaître quelle quantité il exige et celle qu'il consomme. Il n'admet pas de changemens de niveau trop sensibles; les écluses et les retards qu'elles entraînent occasioneraient une dépense trop forte. La navigation d'un canal est sujette à de fréquentes interruptions par les glaces, les inondations, ou pour des réparations; et dans toute espèce de commerce, ces interruptions entraînent des inconvéniens sérieux, souvent des mécomptes et des pertes. Les canaux gênent les droits aux cours d'eau et le dessèchement des terrains, et font ainsi aux propriétés qu'ils traversent un tort infiniment plus grand que si l'on en prenait la partie qu'ils occupent. Les frais de con-

struction d'un canal surpassent ceux d'un chemin en fer; il en est de même des frais de réparations annuelles, et la différence dépend de la nature du pays. Dans une contrée propre à un canal, la différence des premiers frais est plus que compensée par le plus grand effet produit par un moteur donné sur le canal que sur le chemin en fer, pourvu que la vitesse ne s'éloigne pas beaucoup d'une lieue par heure, ce qui donne au canal ainsi placé une supériorité incontestable sur le chemin en fer.

La résistance des corps qui se meuvent dans un fluide augmentant dans le rapport du carré des vitesses, et la trop grande rapidité de l'eau devant dégrader les bords d'un canal, les bateaux qu'on y emploie ne peuvent guère y naviguer avec une vitesse supérieure à celle qu'on leur fait prendre ordinairement; mais sur un chemin en fer on peut obtenir plus de vitesse avec moins d'effort, même en employant le service des animaux.

Un chemin en fer a plus de rapport avec une grande route ordinaire qu'avec un canal, tant par sa construction que par la manière dont il sert. Il diffère de la route en ce qu'il exige d'être fait de niveau ou en pente douce, les montées et les descentes se faisant sur des plans inclinés, au lieu des ondulations irrégulières que présentent les

grandes routes. La nécessité de ces niveaux est ce qui rend un chemin à ornières plus coûteux qu'une grande route; car la dépense du chemin même peut quelquefois être moins considérable que celle d'une bonne route qu'on construirait dans le même endroit, l'intérêt de ce qu'il en coûtera de plus en capital pour faire le chemin à ornières étant moindre que ce qu'il faudra dépenser de plus chaque année pour tenir la grande route en bon état de réparation. Mais un cheval traînera huit fois autant sur un chemin en fer que sur une grande route, en allant au même pas; et il est possible que cette diminution de frais de transport amène par la suite une augmentation proportionnée, ou huit fois plus grande dans la quantité de trafic du pays.

Lorsque les charges qui se transportent sur un chemin en fer ne sont pas égales en allant et au retour, il est bon que la direction de la partie où affluent les marchandises se trouve sur un plan incliné; nous donnerons dans le troisième chapitre les proportions qui conviennent le mieux à la pente, nous bornant à remarquer ici qu'il y a souvent beaucoup d'avantage à n'arriver à l'endroit où l'on doit charger que par une longue montée. C'est ce qui ne se rencontre pas dans un canal, qui doit être partout de niveau. Les montées et les descentes sur des plans inclinés se font beau-

coup plus vite que par des écluses, et ne sont pas limitées quant au changement de niveau.

Mais le plus grand avantage d'un chemin en fer consiste à pouvoir transporter les marchandises les plus pesantes avec diligence et certitude; quand il ne permettrait que de les conduire deux fois plus vite qu'en bateaux, on y trouverait un profit très considérable. Et si l'on veut faire attention que la construction des chemins en fer est encore dans un état peu perfectionné, tandis que les talens de tous nos ingénieurs se sont, depuis près d'un siècle, dirigés vers celle des canaux, on verra qu'il est très permis de croire à des améliorations; et l'on peut, sans crainte de se tromper, prévoir que les chemins en fer rendront par la suite dix fois plus de services au public que les canaux mêmes.

Avant de nous occuper des principales recherches relatives aux chemins en fer, il ne sera peut-être pas inutile, pour y préparer le lecteur, de faire connaître ceux qu'on a déjà exécutés dans ce pays. Après avoir montré ce qui a été fait jusqu'ici, nous ferons voir, à l'aide de l'expérience et du raisonnement, ce qu'il convient de faire maintenant pour rectifier ou pour améliorer ces chemins.

Chemins à ornières en Angleterre.

Il paraît que le premier chemin de cette espèce a été construit dans le voisinage de Newcastle sur Tyne, vers l'an 1680. Il consistait en pièces de bois portées sur des madriers de la même matière. On en voit encore de cette espèce dans quelques places près de la Tyne; mais le bois a été généralement abandonné et remplacé par le fer. Un très grand nombre de chemins qui, par une multitude d'embranchemens, se dirigent des deux côtés de la rivière aux différentes parties des mines, sont formés avec ce métal; on y a établi également plusieurs plans inclinés sur lesquels les chariots avancent, au moyen de machines stationnaires. Les barres sur lesquelles portent les roues des chariots sont de l'espèce de celles dites ornières étroites; et il paraît, d'après l'expérience, que sur un chemin de cette nature, on peut, quand il est en état, traîner 170 kilogrammes avec une force d'un kilogramme, ou bien qu'un seul cheval peut tirer 11,500 kilogrammes, y compris le poids du chariot, en parcourant un espace d'environ 4 kilomètres par heure.

Les chemins en fer qui sont employés à conduire la houille des mines à la rivière de Wear à

Sunderland, sont de la même espèce; quelques-uns ont une étendue de près de 3 lieues. Les chariots qui font ce service ressemblent à ceux des mines de Newcastle.

Un des principaux chemins en fer est celui de Hetton; sa longueur est de $7\frac{5}{8}$ milles anglais (plus de 12,000 mètres). Une machine locomotive à haute pression y sert à conduire de 13 à 17 chariots formant un seul train; les gens du pays nomment cette machine *le cheval de fer*. Elle est représentée dans la figure 2. Le train de 17 chariots, chargés de houille à l'ordinaire, peut peser 65,000 kilogrammes, et quand il est vide 18,800 kilogrammes, ces chariots étant plus forts et plus pesans que les chariots ordinaires à charbon. Le changement total de niveau, depuis la mine jusqu'aux places de déchargement, est de 248 mètres, dont une partie se fait sur des plans inclinés, et le reste par une descente en pente régulière de 3 millimètres par mètre de longueur.

Les barres qui forment le chemin sont de l'espèce dite à bord étroit. (*Voy.* fig. 3, 4, 5 et 6.) Leur plus grande longueur est de 119 centimètres, et la largeur de la face supérieure est de 63 à 64 millimètres; elles s'entaillent les unes dans les autres. Dans les endroits où le chemin est de niveau, chaque barre pèse 27,7 kilogrammes; mais

ces barres ayant été trouvées trop faibles pour les parties courbes, on a porté le poids de celles que l'on y a employées à 32,7 kilogrammes. J'ai remarqué dans quelques endroits voisins des places d'arrivage, des portions de chemin en fer malléable et en barres de quatre mètres et demi de longueur, sur des supports écartés de 91 centimètres l'un de l'autre. (*Voy.* fig. 9 et 19.) Leur épaisseur au milieu, entre les supports, est de 89 millimètres, et leur largeur, en-dessus, de 57 millimètres; le poids d'un mètre de ces barres est d'environ 14 kilogrammes.

Les roues des chariots qui portent la houille ont 89 centimètres de diamètre et 10 rais; elles pèsent 140 kilogrammes. Leurs essieux ont 76 millimètres de diamètre, et tournent dans des anneaux fixes.

Le poids de la machine est d'environ 8000 kilogrammes. (*Voy.* fig. 2.) Elle consiste en une chaudière de 12 décim. de diamètre, ayant un fourneau en dedans. La fumée s'échappe par un tuyau d'environ 4 mètres d'élévation. Le mètre le plus bas est fait en tôle, dont un décimètre carré pèse 0,3 kilogrammes; le reste est en tôle du poids de 0,125 kilogramme par décimètre carré. Il y a deux cylindres travaillant alternativement. Le diamètre des pistons est de 228 millimètres, et

leur course de 60 centimètres, donnant quarante-cinq doubles coups par minute. La vapeur passe dans les cylindres au moyen de soupapes à coulisses que font agir des roues excentriques placées sur l'essieu du chariot qui porte la machine. La pression de la vapeur dans la chaudière est de 3 à 4 kilogrammes sur 1 décimètre carré.

Les roues du chariot qui portent la machine ont 975 millimètres de diamètre; chaque roue a douze rais, et pèse 190 kilogrammes. Le diamètre des essieux est de 89 millimètres; ils sont liés par une chaîne sans fin que fait mouvoir une roue placée sur chaque essieu, de manière que les deux essieux tournent uniformément et d'un mouvement égal. La chaudière est soutenue sur le chariot par quatre pistons flottans, qui font l'effet de ressorts en égalisant la pression exercée sur les roues, et en adoucissant les chaos de la voiture. Chaque piston flottant se garnit comme le piston d'une machine à vapeur, et porte une tige courte de 38 millimètres de diamètre, qui s'appuie sur l'anneau de cuivre dans lequel tourne l'essieu de la roue. L'eau de la chaudière presse sur la face supérieure du piston, et quel que soit l'élévation ou l'abaissement de la roue, la pression sur le piston est à peu près la même.

L'idée ingénieuse d'employer ces pistons au

lieu de ressorts, est due à MM. Loch et Stéphenson de Newcastle, et ils ont obtenu en 1816 un brevet d'invention. On trouvera dans la description des planches d'autres détails sur cette invention, avec des renvois plus nombreux aux diverses parties de la machine. La houille et l'eau nécessaires au service de la machine se portent dans une petite voiture qui est jointe à celle de la machine, et qui lui sert d'allège. La pièce qui tient l'eau peut en recevoir 230 à 240 litres; elle est entretenue d'eau chaude qu'on tire de chaudières placées à différentes stations le long de la route.

Le train de chariots est mis en mouvement par une seule machine, et avance avec une vitesse d'une lieue à l'heure; et pour les mines, où la dépense d'une machine en combustible n'est qu'une bagatelle en comparaison de celle qu'entraînent les chevaux, ce dernier mode est vraisemblablement économique. On nous a assuré que les machines sont visitées toutes les semaines. La voiture qui les porte peut être très aisément dirigée, et elle peut, à volonté, pousser le train devant elle, ou le tirer à sa suite. Le mouvement de l'ensemble est aussi curieux que surprenant.

L'avantage immense que retiraient les mines des comtés de Durham et de Northumberland, de

l'établissement des chemins à ornières, même de ceux à ornières en bois, fut cause qu'on ne tarda pas à les imiter dans le voisinage de Whitehaven, dans le Cumberland; ils y furent bientôt très multipliés, mais le bois a fini pas être remplacé par la fonte. De là l'usage de ces chemins s'est étendu dans les comtés d'York (*) et de Derby, dans le pays de Galles et en Écosse. Nous allons dire un mot de ceux qui ont le plus d'importance, en commençant par le plus considérable de ceux qu'on a faits dans l'intérêt général du commerce.

Route en fer du comté de Surrey.

Cette route a son origine sur la rive méridionale de la Tamise, près de Wandsworth, dans le Surrey; elle se rend, en suivant la direction du sud-est, à Croydon, d'où elle va plus directement vers le sud jusqu'à Merstham, ce qui fait un trajet de près de 18 milles anglais. Sa pente n'est nulle part de plus de 8 millimètres par mètre. Les actes du parlement qui en autorisent l'établisse-

(*) Sméaton, dans un rapport daté de 1779, cite le premier établissement dont il ait eu connaissance, d'une route à ornières établie dans le comté d'York, pour transporter la houille aux rivières navigables.

ment sont des 41, 43 et 45e années du règne de George III (1800—1804). C'est une route à double voie, dont les barres qui forment le fond de l'ornière sont plates, et ont environ 1 décimètre de largeur sur 25 millimètres d'épaisseur; le rebord qui retient les roues a 76 millimètres de hauteur, et sa largeur est de 12 millimètres. Le fond est profondément rayé par le frottement des roues sur le sable et sur la boue qui tombent dans l'ornière. Les premières qu'on a faites ayant été trouvées trop faibles, celles qu'on emploie aujourd'hui pour les réparations sont en fonte. Leur forme est représentée fig. 19.

Le poids des chariots est d'environ 1000 kilogrammes, ou d'un tonneau métrique. Ils ont 1 mètre et demi de largeur, 2 mètres et demi de long, et 60 centimètres de profondeur. Ils peuvent porter 3 tonneaux de charge, et ne doivent pas dépasser 3250 kilogrammes. Leurs roues, en fer coulé, ont 38 millimètres de largeur de jante, et 90 centimètres de diamètre; elles font leur révolution sur des essieux coniques dont le diamètre en dedans est de 60 millimètres, et à l'extrémité qui porte l'esse de 38 millimètres.

Lorsque la partie méridionale fut, en 1805, livrée à la circulation, 12 chariots chargés de pierres, et pesant plus de 38 tonneaux, conduits

par un seul cheval, parcoururent sans difficulté apparente, une distance de 6 milles anglais (9600 mètres) en une heure quarante-une minutes sur une montée d'une partie sur cent vingt. D'après les expériences de M. Palmer, une force de 1 kilogramme doit tirer 60 kilogrammes, sur les parties du chemin à ornières qui sont de niveau, à raison de 2 milles et demi anglais par heure, ou bien un cheval d'une force moyenne doit traîner plus de 4000 kilogrammes. Nous comparerons ces résultats dans le cinquième chapitre, nous dirons seulement ici qu'un chariot sur cette route est conduit par un seul cheval.

Le chemin en fer du comté de Surrey étant un de ceux en très petit nombre qu'on a tenté d'établir dans l'intérêt général du commerce, les causes qui l'ont empêché d'avoir assez de succès pour encourager d'autres entreprises du même genre méritent d'être recherchées. On peut les trouver en partie dans la nature même de la route; car l'effet produit est bien éloigné de celui obtenu sur les routes de la première espèce, tandis qu'il est aussi dispendieux, que les chariots sont lourds et que leur charge est trop peu considérable; et comme ces chariots ne quittent pas le chemin à ornières, ce qui force à charger une seconde fois les objets transportés pour pouvoir

les conduire à leur destination, il en résulte que les avantages ne sont point équivalens au surcroît de dépense.

La destination des chemins en fer, comme celle des canaux, doit toujours être le transport de marchandises ou de matériaux d'un entrepôt dans un autre; le détail de la distribution de ces objets doit se faire par d'autres moyens; par conséquent il n'est pas probable qu'ils puissent réussir comme moyens généraux de communication pour le commerce, quand les distances sont très rapprochées. Lorsqu'on a une quantité considérable de marchandises à transporter d'un lieu à un autre, il est très maladroit de les diviser en petits chargemens; il vaut bien mieux se servir de chariots assez grands pour charger à la fois un volume considérable d'objets. On peut alors les suivre et les surveiller sans peine; l'emballage, le chargement et le déchargement se font avec plus de facilité. Rien n'empêche qu'on ne construise un chariot capable de porter une forte charge, en lui donnant six ou huit roues, afin que l'effort de chaque roue sur l'ornière ne soit pas plus grand qu'il ne faut. Pour le transport des produits des mines qu'on n'emballe point, les petits chariots conviennent mieux, parce qu'on les vide plus promptement que les grands; mais il n'est pas facile de

bien ranger des ballots lourds et volumineux dans de petits chariots; il arrive souvent qu'ils remplissent le chariot sans qu'il se trouve chargé. Sur un chemin de fer destiné au commerce général, les chariots doivent être au moins assez grands pour porter une charge égale à celle des voitures de roulage qui vont par relais. En les faisant à six roues, on serait dispensé d'élever autant la charge.

Les mines de houille qu'on exploite dans le voisinage de Leeds et de Wakefield, communiquent aux canaux par un grand nombre de chemins en fer, et la ville même de Leeds reçoit son approvisionnement de charbon des mines de Middleton, au moyen d'un de ces chemins, sur lequel les chariots sont mis en mouvement par des machines à vapeur locomotives. Ces chariots diffèrent de ceux qu'on emploie près de Newcastle et de Sunderland : au lieu de dépendre pour la diminution de la vitesse, du frottement des roues du chariot qui porte la machine à vapeur, les barres qui forment le fond de l'ornière ont des crans dans lesquels entrent les dents de roues que fait tourner la machine, et qui agissent à la manière des roues d'engrenage. Cette espèce de chariot pour la machine à vapeur a été imaginé par M. Blenkinsop, qui en a fait l'essai en 1811. La chaudière est portée sur un chariot à quatre roues,

sans dents, et s'appuie immédiatement sur les essieux. La machine est à haute pression, avec deux cylindres. Des bielles de combinaison font mouvoir deux roues d'engrenage au moyen de manivelles qui font entre elles des angles droits. L'engrenage communique le mouvement aux roues qui portent dans les crans de l'ornière de fer, par une roue à dents placée sur le même essieu. Une machine de ce genre, remorquant un train de 30 chariots de houille, dont chacun pesait plus de trois tonneaux, a fait jusqu'à près de 3 $\frac{1}{4}$ milles anglais, près de 1 $\frac{1}{2}$ lieue, par heure.

Quand on emploie ce système d'engrenage, on peut conduire un train de chariots sur un chemin de fer plus en pente que lorsque la réaction se fait par le frottement des roues sur l'ornière; mais, même avec les roues à dents, l'inclinaison a des bornes peu étendues et au-delà desquelles il serait dangereux d'aller. Nous montrerons celles qu'on ne doit pas dépasser, dans l'un et l'autre cas, lorsque nous en serons au troisième chapitre.

Chemin en fer de Dewsbury et Bristal.

L'objet de ce chemin est le transport des charbons depuis les mines de la paroisse de Bristal

jusqu'aux endroits où ils sont embarqués dans les vaisseaux qui viennent charger dans le Calder et l'Hebble. Son étendue est d'environ 3 milles anglais; il a été terminé en 1805.

Le canal dit *Ashby de la Zouch*, qui a été ouvert en 1805, aboutit à un chemin en fer de 3 $\frac{3}{8}$ milles anglais de long, allant aux carrières de pierres à chaux de Ticknall dans le Derbyshire; à un autre chemin en fer de 5 milles d'étendue qui se rend aux mines de houille de Measham; et à un troisième chemin de 6 $\frac{1}{2}$ milles allant aux carrières de pierres à chaux de Cloudshill.

Le canal de Derby tient aussi à plusieurs chemins à ornières de fer qui se rendent aux mines de houille d'Horseley, à l'endroit appelé Smithy-Houses, près de Derby, ce qui fait une longueur de 4 milles, et aux moulins de Smalley, une longueur de 1 $\frac{1}{2}$ mille.

D'autres chemins à ornières de fer partent des canaux de Cromford et d'Erewash, et le canal de la forêt de Charnwood est mis en communication avec les bâtimens qui chargent dans la rivière de Soar par un chemin en fer de 2 $\frac{1}{2}$ milles de longueur avec une montée de 56 mètres.

Le chemin en fer qui va de Chapel-Milton à Loads-Knowl s'étend depuis le canal de Peake-Forest à Chapel-Milton dans le Derbyshire, jus-

qu'aux carrières de pierre à chaux de Loads-Knowl, distantes de 6 milles du canal. Il s'y trouve un plan incliné de 169 mètres de long, ayant une différence de niveau de 62 mètres. Il a été fait sous la direction de M. Benjamin Outram, ingénieur.

Le canal de Lancastre a un chemin en fer qui s'étend de Clayton-Green en traversant la vallée de la Ribble jusqu'au haut de son bord opposé; distance de 3 ¼ milles. La communication entre les parties de ce canal se fait au moyen du chemin en fer; il y a un plan incliné de chaque côté du vallon : la différence de niveau est de 67 mètres.

Un chemin en fer part de la rivière de Wye, près de Mittchell-Dean, se rend par la forêt de Dean à Lydney sur la Saverne, ayant un embranchement qui va à Monmouth par Colford. Dans le même canton, un chemin en fer de 5 milles de longueur, va de la Saverne aux mines de houille de la forêt.

Les avantages particuliers des chemins en fer pour les grands changemens de niveau, ne se font nulle part mieux remarquer que dans les plans inclinés du canal du Shropshire.

Le canal de Shropshire devant traverser un canton où les changemens de niveau étaient brusques et considérables, on jugea convenable

de se servir de plans inclinés pour transporter les bateaux d'un niveau à un autre. Le premier de ces plans a 317 mètres de longueur pour une hauteur perpendiculaire de 63 mètres. Il porte un chemin de fer à double voie et très fort sur lequel se placent les bateaux avec leur charge de 5 tonneaux, et montés sur des chariots. Le second plan a 547 mètres de long. La différence de niveau est de 38 mètres. Le troisième plan a 297 mètres de long ; la différence de niveau est de 36 mètres. Tous ont été exécutés sur des plans de M. W. Reynolds, qui, dès l'année 1788, avait fait établir un plan incliné du même genre pour transporter des bateaux du poids de 8 tonneaux dans un endroit où la différence de niveau était de 22 mètres.

On a construit dans le Cornwall un chemin en fer de 5 milles anglais de longueur, qui va du havre de Portreth aux mines près de Redruth.

Enfin, un chemin en fer fort étendu, et qui se rend de Stockton par Darlington aux mines de houille de la partie du sud-ouest du comté de Durham est presque entièrement terminé. Il suit depuis Stockton la direction de l'ouest pendant 3 ½ milles ; là un embranchement de 2 milles se porte au sud jusqu'à Yarm; la ligne principale passe tout près de Darlington, et à 4 milles de là, un embranchement de près de

2 milles se dirige au sud jusqu'à Pierce-Bridge. A 5 milles encore plus loin, sur la grande ligne, un nouvel embranchement conduit vers le nord-est aux mines de houille du Black-Boy et de Coundon; cette branche a plus 5 milles de long. La ligne principale continue au-delà d'Evenwood jusqu'auprès des mines de Norwood, et revient dans la direction du nord-est aux mines de houille d'Etherly et de Witton-Park. L'étendue totale de la grande ligne est d'environ 32 milles (plus de 11 lieues de 25 au degré). Ce chemin est de l'espèce dite à ornières étroites, et dans le dernier acte du parlement qui le concerne, on a mis des clauses qui autorisent les entrepreneurs à faire usage de machines à vapeur locomotives.

Ces exemples de l'application de chemins en fer en Angleterre, peuvent donner une idée de ce mode de transport qui devient de plus en plus en faveur.

Chemins en fer dans le pays de Galles.

Dans le pays de Galles, les chemins en fer qui communiquent des forges aux mines de houille, ou qui vont des principales mines aux canaux et aux rivières, sont très nombreux, et l'expérience a prouvé qu'ils étaient très avantageux aux entrepreneurs et au public. Les principaux chemins en

fer sont joints à quantité de chemins particuliers plus petits, et qu'on nomme communément *tram-roads*, qui facilitent beaucoup le commerce dans un pays aussi inégal et dont les chemins ordinaires sont très mauvais. A peine, en 1791, y avait-il un seul chemin en fer dans la partie méridionale du pays de Galles, et en 1811, les routes achevées suivant ce système, et communiquant avec des canaux, des mines, etc., dans les comtés de Monmouth, de Glamorgan et de Caermarthen, formaient une étendue de près de 150 milles, sans y comprendre celles qui sont dans l'intérieur des mines dont une compagnie, à Merthyr-Tidvil possède environ 30 milles de longueur.

Comme la partie supérieure du canal de Cardiff dans le Glamorgan manque souvent d'eau, on a construit parallèlement à elle le chemin en fer de Cardiff et de Merthyr, de près de 9 milles d'étendue, et qui sert principalement pour le service des forges de Plymouth, de Pendarran et de Dowlais.

L'acte du parlement qui autorise la construction de cette route a été passé en 1794, en faveur de MM. Hompray, Hill et compagnie. Il paraît que c'est le premier acte du parlement qui ait été obtenu pour un chemin de cette nature. La largeur du terrain que la compagnie était autorisée à acquérir était d'environ 64 centimètres; la longueur

totale de la ligne est de $26\frac{3}{4}$ milles. C'est un des cas où la rudesse d'un pays rend toute espèce de communication difficile; mais un chemin en fer a moins de difficultés à surmonter dans ces sortes de terrains que n'en a un canal.

C'est sur ce chemin qu'a été essayée, le 21 février 1804, la machine à haute pression pour faire aller les voitures, dont M. Trevithick est l'inventeur. Le même genre de machine a été employé, mais avec plus de succès, par M. Blenkinsop et par d'autres.

Le canal d'Aberdare, qui forme une branche de celui de Cardiff, communique au canal de Neath par des chemins en fer terminés par un plan incliné immense sur lequel les voitures sont tirées par une machine à haute pression.

Le chemin en fer de Sirhoway part du canal de Monmouth, à Pillgwelly, traverse Tredegar-Park, et ensuite la rivière d'Ebwy à Risca, sur un pont de 16 arches, et après avoir suivi le cours de la rivière Sirhoway, se rend des forges de Tredegar et de Sirhoway, aux carrières à chaux de Trevil, ce qui fait une distance totale de 28 milles, ou de 10 lieues à peu près. Ce chemin est accompagné dans toute sa longueur d'une grande route ordinaire en très bon état. Ce chemin a plusieurs embranchemens qui conduisent à

différentes mines de charbon, un autre qui va aux forges de Romney, et d'autres encore allant de deux endroits au canal du comté de Monmouth. Un cheval suffit pour traîner, en descendant ce chemin en fer, environ 10000 kilogrammes, et pour remonter les chariots qui portaient cette charge. L'acte qui en a autorisé la construction a été passé dans la 42[e] année du règne de George III (1801).

Le chemin en fer de Brinore commence aussi à celui de Sirhoway, et suit, en passant sur Black-Mountain (la montagne noire), jusqu'à la vallée de Uske à Brecon, et de là à Haye sur la Wye. Au moyen de cette communication, le prix de la houille a été considérablement diminué dans les comtés de Radnor et de Hereford.

Le chemin en fer de Blaen-Avon conduit aussi au canal du comté de Monmouth. Sa longueur est de $5\frac{1}{2}$ milles, et la différence de son niveau est de 185 mètres depuis son origine jusqu'au fourneau de Blaen-Avon.

La route en fer du comté de Caermarthen commence au havre de Llanelly et s'étend dans une longueur de 15 milles, et au milieu d'une contrée riche en mines de charbon, jusqu'aux fours à chaux de Llandebie. Des embranchemens partant de sa partie orientale vont aux mines de houille du

général Waide. Son but général est le transport des charbons de terre, du fer, du plomb, etc. Il a été autorisé par acte du parlement, en 1801. D'après les expériences de M. Palmer, il paraît que sur les portions de ce chemin qui sont de niveau une force d'une livre ne peut mettre en mouvement que 59 livres, ou qu'un cheval n'y peut traîner que 3900 kilogrammes (*).

Le chemin en fer d'Oyster-Mouth s'étend dans un espace de 7 milles le long de la côte, depuis Swansea jusqu'au village d'Oyster-Mouth. Il sert principalement au transport des pierres à chaux; l'acte qui l'autorise est de 1803.

Plusieurs autres chemins de même espèce communiquent des mines de houille voisines avec le canal de Swansea.

Le chemin en fer d'Abergavenny a son origine près du canal de Brecknock, et passe sur un pont pour se rendre à Abergavenny. Du même canal part un embranchement de chemin en fer qui va à Uske et à Haye; et plusieurs autres branches vont aux mines de houille et de fer. Aux forges, près de Pontypool se trouvent plusieurs plans inclinés dans des situations où la différence de niveau est considérable.

(*) *Description of a Rail-way on a new principle.*

Le chemin en fer de Ruabon-Brook commence près d'un bassin étendu à Pontcysylte, sur la rive nord de la Dée. Ce chemin est à double voie; il s'élève par une pente douce jusqu'au-delà des forges de M. Hazledine, passe près d'un grand nombre de mines de houille, et arrive à Ruabon-Brook après avoir parcouru une distance de 3 milles.

Nous ne citerons plus qu'une seule des routes en fer du pays de Galles, c'est celle qui sert au transport des ardoises des carrières de Penrhyn; elle diffère des autres routes en fer. Toutes les autres routes en fer du pays de Galles sont, presque sans exception, de l'espèce dite *tram-roads*, chemins en fer à ornières plates.

Le chemin en fer de Penrhyn a 6 $\frac{1}{4}$ milles de longueur, depuis les carrières d'ardoises de Penrhyn, dans le comté de Caernavon, jusqu'au port de Penrhyn. Il est divisé en cinq stations ou relais. La différence de son niveau est d'une partie sur 96. Il y a trois plans inclinés. Commencé en octobre 1800, il a été terminé en juillet 1801. Les barres dont il se compose sont de forme ovale, en fonte, et écartées de 60 à 61 centimètres. La longueur des barres partielles est de 136 centimètres. (*Voyez* fig. 7.) Deux chevaux parcourent un relais six fois par jour en traînant 24 chariots;

chaque chariot porte un tonneau de charge, ce qui fait 144 tonneaux pour les six voyages de chaque jour. Les roues des chariots sont de fonte; elles ont de 35 à 36 centimètres de diamètre, et pèsent de 15 à 16 kilogrammes (*). D'après les expériences de M. Palmer, il faut une force d'une livre pour tirer 87 livres sur cette route dans les parties qui sont de niveau, tandis que sur les chemins en fer de Newcastle, la même force peut tirer un poids double. Cette différence vient de la petitesse des roues dont on se sert sur la route de Penrhyn. Mais tout imparfaite qu'elle est, elle a été très utile aux propriétaires des carrières d'ardoises, en leur épargnant des frais immenses en chevaux. Les chariots sont très bas, et paraissent convenir assez pour transporter de l'ardoise à des distances peu considérables : dans le fait, ce sont plutôt des espèces de traîneaux que de véritables chariots.

Chemins en fer en Écosse.

Il n'existe pas encore en Écosse de chemins en fer d'une grande étendue, quoiqu'on y en ait projeté

(*) *Repertory of Arts*, vol. III, pag. 285, et vol. IX, pag. 16, nouv. séries.

de très considérables; mais on s'en sert beaucoup pour de petites distances dans quelques-unes des principales mines de houille, ou pour d'autres travaux. Le plus long est celui qui va de Kilmarnock au havre de Troon, dans le comté d'Ayr; il a 10 milles d'étendue.

Ce chemin a été construit aux frais du duc de Portland, propriétaire des mines de houille du canton. Il est de l'espèce des chemins en fer dits tram-roads (à ornières plates); on croit que M. Jessop, qui avait une grande prédilection pour ce genre de chemins, en a eu la direction. Son principal usage est pour le transport de la houille et de la chaux, dont des quantités très considérables sont par son moyen livrées au commerce. Les dimensions suivantes sont celles des chariots de Kilmarnock : longueur, 2 mètres; largeur, 113 centimètres; profondeur, 76 centimètres. Chaque chariot contient 42 boisseaux de charbon, équivalant à plus de 1500 kilogrammes de bon charbon, et de 1700 de charbon humide. Le poids du chariot vide est de 660 kilogrammes. Quelques chevaux descendent 2 chariots chargés, d'autres en conduisent 3; mais ici les chariots ne sont pas tous semblables, et même on permet aux chariots ordinaires de suivre cette route, pourvu que leurs roues soient cylindriques, et qu'ils ne soient pas

chargés de plus de 1400 kilogrammes par paire de roues (*).

Le chemin en fer de la mine de houille d'Alloa a 2 ½ milles environ de longueur. Les ornières sont en fonte; chaque chariot porte un tonneau de charbon, et un cheval peut en conduire 8 à la fois sur ce chemin. Dans d'autres cantons de l'Écosse où des mines s'exploitent, on a construit des chemins en fer, la plupart du genre de ceux dont les roues des chariots ont des rebords qui les retiennent sur la barre de fer qui les porte; les derniers qu'on a faits sont en général en fer malléable. Suivant M. Stevenson, l'établissement des chemins en fer pour le service des forges de Carron a réduit les frais moyens de transport pour chaque mois de 1200 livres sterlings à 300 (**), (de 30240 à 7560 fr.).

Le lecteur aura pris dans ce qui précède quelque idée de l'importance de l'économie des chemins en fer, et doit se trouver, jusqu'à un certain point, préparé, par les faits que nous avons mis sous ses

(*) Art. *Rail-way*. Nappier's sup., *Encyc. brit.* 415—417.

(**) Brewster's, Edimb., *Encyc.*, article *Rail-way*, 304.

yeux, à entrer un peu plus avant dans les détails de ce système vraiment anglais de construction des routes (*).

(*) L'art. *Canal* de l'*Encyclopédie* de Rees, fourni par M. Farey, et celui sur la *Navigation intérieure*, qui se trouve dans l'*Encyclopédie* d'Édimbourg, et qu'on attribue à M. Telford, nous ont fourni une partie des faits que nous rapportons sur les routes en fer.

CHAPITRE II.

Des différentes espèces de chemins à ornières, et comparaison de leurs avantages. Chemins à ornières étroites, — à ornières plates, — à une seule ornière.

On ne connaît que trois espèces différentes de chemins à ornières. La plus ancienne manière de les faire et la plus généralement en usage, consiste à former avec des barreaux de bois ou de fer les lignes sur lesquelles portent les roues des chariots. Ces roues sont bordées de chaque côté d'un renflement formant une ornière dans laquelle s'emboîte le barreau, ce qui les maintient dans la voie. On distingue maintenant ce genre de chemin par le nom de chemin à ornières étroites, les barreaux de fer qui forment la voie étant étroits et fort épais.

La seconde espèce de chemins à ornières diffère de la première, en ce que les rebords, au lieu d'être aux roues, sont placés au côté même des barreaux ou des bandes de fer qui forment les lignes. Elle a l'avantage de pouvoir servir

aux chariots qu'on emploie sur les routes ordinaires. Les chemins de cette nature sont dits à ornières plates, ou *tram-roads*.

La troisième méthode consiste à ne faire qu'une seule ligne pour des voitures à deux roues. Les barres qui la forment sont élevées au-dessus de la surface du sol, et la voiture s'y trouve comme suspendue. Cette méthode est nouvelle, et on peut espérer qu'elle offrira beaucoup d'avantages. Nous nous permettrons cependant quelques remarques à cet égard, mais nous les ferons plus tard, et après avoir décrit successivement les trois espèces de chemins que nous venons d'indiquer.

Chemins à ornières étroites.

Ces chemins ont d'abord été construits en bois pour le transport des charbons, depuis les mines des environs de Newcastle jusqu'à la rivière de Tyne. Quelquefois on les recouvrait d'une bande de fer dans les parties où ils étaient le plus exposés aux dégradations. En adoptant depuis le fer coulé à la place du bois, on a, dans le même district, conservé le même genre de roues et la même forme de construction pour les barres, avec la seule différence qu'a pu nécessiter l'emploi d'une nouvelle matière. Les figures 3, 4 et 5 font

voir le profil, le plan et la coupe transversale d'une pièce de fonte de la forme de celles qu'on emploie pour la construction des chemins de fer les mieux entendus sur les bords de la Tyne et de la Wear. Les chariots roulent sur le bord arrondi de la barre, qui est aussi polie et aussi unie, aussi régulière qu'on a pu la couler. La longueur ordinaire des barres est de 3 pieds anglais, un peu plus de 91 centimètres; l'épaisseur, au milieu, d'environ 114 millimètres, et la largeur du bord est de 50 centimètres; quelquefois les barres ont 4 pieds anglais, ou un peu plus de 12 décimètres de long. Les bouts des barres se réunissent dans une pièce de fer coulé qu'on nomme le *siége* (*voy.* fig. 6), laquelle est fixée dans des blocs de pierre dont la base est fort large, et qui pèsent depuis 75 jusqu'à 100 kilogrammes. Ces blocs sont solidement posés dans la terre, et convenablement disposés, suivant que le demande la forme de la route, avant qu'on place le *siége* de fonte. La bonté de la route dépend beaucoup de la solidité qu'on donne aux blocs de pierre. Dans le pays de Galles on a un peu changé la forme des barres pour cette espèce de chemin; car celles du chemin en fer de Penrhyn étaient dans le principe de figure ovale; mais l'on s'est aperçu que les barres ovales creusaient très vite le bord des roues, et qu'elles

se trouvaient alors très serrées, ce qui occasionait beaucoup de frottement, et forçait de changer souvent les roues. On a donc donné aux barres la forme que représente la section qu'on voit fig. 7. Les traverses qui les lient ont en même temps été faites en fonte, avec des entailles en queue d'aronde pour recevoir les bouts des barres. Chaque barre a 137 centimètres de longueur. Les deux rangs sont écartés de 60 centimètres. Le poids de chaque barre est d'environ 16 kilogrammes; celui des traverses est de 6 à 7 kilogrammes. Chaque chariot porte un tonneau de charge.

La forme de ces barres est très inférieure à celles qu'on emploie à Newcastle. Le renflement au milieu de l'épaisseur des barres du chemin de Penrhyn place la plus grande quantité de fer dans la partie de l'épaisseur où il offre le moins de résistance. La manière d'unir les deux lignes de barres au moyen de traverses en fonte serait peut-être utilement employée dans d'autres cas, mais nous ne croyons pas que la liaison des barres de la voie avec les traverses soit aussi bien entendue que celle faite par des moyens semblables aux *siéges* de fonte employés pour les autres routes du même genre.

On trouvera dans le chapitre VII des règles

pour calculer la force et les dimensions des diverses parties d'un chemin quand on les fait en fer coulé.

Nous avons dit plus haut qu'on avait quelquefois employé le fer malléable pour garantir les ornières de bois; il paraît que M. George Grieve est le premier qui ait eu l'idée de remplacer le bois lui-même par des barres de fer malléable, dans les mines de houille de sir John Hope, près d'Édimbourg. Ces barres n'avaient que 31 à 32 millimètres de côté, et le chemin ne servait qu'à des transports fort peu considérables. Du fer malléable plus fort a été employé par M. Neilson de Glasgow, à un chemin en fer sur les propriétés du comte de Glasgow, commençant aux mines et aux fours à chaux d'Hurlet, et allant jusqu'au canal de Paisley, à 2 ½ milles de distance. La longueur de chaque barre est de 9 pieds (2,74 mètres), et elles sont appuyées de 3 en 3 pieds. Elles ont 57 millimètres d'épaisseur et 19 millimètres de largeur. Les chariots y portent environ 1800 kilogrammes.

Il est évident que des barres rectangulaires en fer forgé doivent présenter une surface trop étroite pour les roues d'un chariot, à moins qu'on ne veuille y faire entrer plus de métal que l'économie ne le permet. C'est pour obvier à cette difficulté que M. Birkinshaw, des forges de Bedlington

dans le comté de Durham, a pris un brevet d'invention pour une nouvelle forme de barres destinées à la construction des chemins à ornières de fer. L'invention consiste à donner à la barre la forme d'un prisme triangulaire, ou toute autre variété de cette forme qui peut mieux remplir l'objet. On voit, fig. 11, la coupe des barres recommandées par M. Birkinshaw. Il veut qu'on leur donne 5 mètres et demi de longueur (18 pieds anglais). La figure 10 fait connaître une autre forme, qui est évidemment meilleure. Le conseil qu'il donne de souder les joints serait plus nuisible qu'utile, à cause de l'augmentation de longueur que prend le métal quand la température s'élève.

Le principal avantage du fer forgé pour la construction de ces chemins est de diminuer le nombre des joints, et la difficulté de rendre les barres parfaitement unies à l'endroit des joints a beaucoup contribué à en introduire l'usage.

Les chemins à ornières étroites conviennent particulièrement pour des travaux permanens. Leur construction ne permet pas aux voitures ordinaires d'y voyager; et, sur tout chemin en fer où ces sortes de voitures peuvent être employées, elles font nécessairement plus de mal à la surface en fer sur laquelle elles se meuvent, qu'elles

ne peuvent procurer d'avantages en compensation : il est aussi très vraisemblable que ces chemins peuvent être tenus en bon état plus facilement que les autres.

Dans tout chemin en fer, il est de la plus grande importance que la surface des barres qui le composent soit parfaitement unie, parfaitement polie. L'objet même qu'on a eu en vue en plaçant des pièces de bois ou de fer pour porter les roues des voitures, est d'obtenir des surfaces de cette nature ; mais il ne serait pas rempli, et le chemin ne se conserverait pas long-temps en bon état, si les charrettes ou les chariots ordinaires avaient la permission de les parcourir et d'y rouler avec leurs roues chargées de boue et de gravier. Cependant, il est facile de concevoir que les voituriers doivent être souvent tentés de suivre le chemin en fer ; car la charge qui exige la force d'un cheval sur une route ordinaire pourrait être tirée sur ce chemin par un seul homme ; de sorte qu'en y plaçant leur voiture, ils peuvent en avançant plus vite fatiguer moins leurs chevaux.

Routes à ornières plates.

Les bandes qui forment ces sortes d'ornières ont toujours été faites en fer coulé. Il est vrai qu'on a

employé et qu'on emploie même encore quelquefois des planches de bois pour un service analogue, mais on ne peut guère les considérer comme fromant un chemin à ornières. Quoi qu'il en soit, les ornières plates sont on ne peut plus convenables pour un service temporaire, et dans leur forme ordinaire (*voy.* fig. 18) on s'en sert beaucoup dans les carrières, dans les mines, pour la construction de nouvelles routes ou celle des canaux, pour le transport des pierres de taille et mille autres objets.

Les barres qui forment ces sortes d'ornières sont d'une forme très faible relativement à la quantité de fer qui y entre; dans quelques endroits on a jugé nécessaire de les renforcer en ajoutant une bande en-dessous. (*Voyez* fig. 19.) C'est avec des ornières ainsi doublées que se font les réparations de la route à ornières plates du Surrey. Ce renfort les rend certainement plus propres à résister qu'aucune autre forme de construction que nous connaissions. (*Voy.* chap. VII.)

Comme les ornières plates peuvent être employées avec le plus grand avantage à former des chemins pour un service temporaire, il est important de connaître le moyen le plus convenable et le plus expéditif de les établir sur le terrain. Celui dont on se sert communément consiste à les fixer avec des clous ou des boulons sur des traverses dor-

mantes en bois. Le grand inconvénient de cette méthode, c'est la difficulté d'enfoncer les clous et de les arracher quand on veut changer le chemin.

Lorsque la route doit être permanente, on en fixe ordinairement les ornières avec de grands clous qui s'enfoncent dans des quartiers de bois qu'on a fait entrer auparavant dans les blocs de pierre destinés à porter les ornières. (*Voyez* fig. 18.)

Le seul essai dont nous ayons connaissance pour perfectionner la manière de poser les ornières plates, et qui donne quelque facilité pour les mettre en place et les enlever, est celui qu'a fait M. Le Caan. Nous allons le décrire, quoique nous ne l'approuvions pas entièrement; peut-être suggèrera-t-il quelque chose de mieux.

Ces ornières sont faites de manière à se fixer les unes par les autres et sans nécessité de les clouer. La figure 21 montre la coupe longitudinale de deux ornières placées sur les blocs de pierres CDE, et la figure 20 en montre le plan. Les ornières sont jointes par un assemblage à queue d'aronde. Chacune est garnie d'une arête oblique qui entre dans le bloc de pierre, et pour faciliter le déplacement des ornières lorsqu'il y a quelque chose à réparer, il y a de 27 en 27 mètres une ornière dont l'arête est perpendiculaire, comme on le voit en E. On voit, dans la fig. 22,

le bout d'une ornière avec le tenon qui se place dans l'entaille au bout d'une autre ornière; on y voit aussi la forme d'une arête oblique.

Le diamètre de l'arête, près de l'ornière, est de 44 millimètres, et de 25 seulement à la pointe; sa longueur est de 63 millimètres et son inclinaison de 8 degrés. (*Voyez* fig. 21.) L'arête porte à l'extérieur, et dans toute son étendue, une rainure qui est faite pour permettre à l'eau qui peut se trouver dans le trou de se dilater, s'il survient de la gelée; elle sert aussi à passer un fil de fer pour retirer le morceau d'une arête qui viendrait à se casser. Les trous pour les arêtes devraient avoir une profondeur de 76 millimètres, et être creusés de manière que l'extrémité de l'ornière pût être solidement fixée sur le bloc de pierre qui la soutient.

La figure 22 représente un des bouts d'une ornière; H en est le rebord ou le renflement droit; I, la partie plate sur laquelle tourne la roue du chariot; D, une arête, et K, une projection en arrière pour rendre les ornières plus solides sur les blocs. La longueur commune de ces ornières plates en fonte est de 91 centimètres; le rebord H a 38 millimètres de hauteur; la partie plate de l'ornière ou le fond 88 à 100 millimètres de largeur et 19 millimètres d'épaisseur; mais ces di-

mensions peuvent varier suivant les circonstances. Le poids le plus généralement convenu est de 20 kilogrammes à peu près pour chaque ornière. Les extrémités d'où les arêtes ressortent et où se font les tenons et les entailles qui les reçoivent, devraient avoir 6 ou 7 millimètres en épaisseur de plus que le reste de l'ornière.

Le poids des blocs ne doit pas être au-dessous de 50 à 55 kilogrammes, et dans quelques terrains, il en faut de plus pesans encore.

Par cette méthode les roues des voitures ne sont pas arrêtées par des têtes de clou qui s'élèvent au-dessus du niveau des ornières, et les blocs ne sont pas dérangés pour fixer les pièces de fonte; et quand il y a des réparations à faire, 22 à 23 mètres de longueur d'ornières peuvent être enlevés et replacés en dix minutes. A raison de la nature de l'assemblage, il est très difficile de s'écarter de la ligne droite : quand des lignes courbes sont nécessaires, les ornières doivent être faites exprès pour cet objet (*).

Quand on arrête les ornières avec de grands clous dans les blocs qui les soutiennent, il est assez dif-

(*) *Transactions of the Society of Arts*, vol. XXV, an 1807.

ficile de tenir l'endroit du joint bien uni et les bouts des ornières à leur place; mais il paraît qu'on peut remédier à cet inconvénient en employant un taquet pour recevoir les extrémités des ornières à l'endroit du joint. Cette amélioration est due à M. Wilson, qui l'a appliquée à la route en fer de Froon.

On aime beaucoup les routes à ornières plates dans le pays de Galles, où leur usage rend important que la pression sur le chemin se divise le plus qu'il est possible. C'est à cause de cela qu'on y a des chariots aussi petits, et sur lesquels l'effet d'une force donnée ne surpasse pas la moitié de ce qu'il devrait être. Quoi qu'il en soit, on doit juger par l'augmentation prodigieuse des chemins en fer dans cette principauté, qu'on y trouve un avantage réel à employer ce moyen de transport.

Chemin en fer à une seule ornière.

L'idée de ce chemin, inventé par M. Palmer, est neuve et ingénieuse. La voiture est portée sur une ornière unique, ou plutôt sur une ligne de barres de fer élevée de 91 centimètres au-dessus du niveau du sol, et appuyée sur des piliers placés à distances égales, et à 3 mètres environ l'un de l'autre. La voiture consiste en deux réceptacles ou caisses suspendues, des deux côtés de la voie, à une forme

4..

en fer ayant deux roues d'environ 30 pouces de diamètre. Les bords des roues sont concaves et embrassent exactement le bord convexe des barres qui forment la voie; et le centre de gravité de la voiture, soit qu'elle soit vide ou pleine, se trouve placé si fort au-dessus du bord supérieur de la voie, que les deux caisses restent en équilibre et que leur charge peut être fort inégale sans qu'il en résulte d'inconvénient, la largeur de la voie, qui leur sert comme de pivot, étant d'environ 100 millimètres. Les barres sont faites aussi de manière à pouvoir s'ajuster et être maintenues droites et unies.

Les avantages de ce mode sont de rendre le frottement latéral moins considérable que dans le système des ornières étroites; de défendre mieux le chemin contre la poussière ou toute autre matière qui peut tendre à retarder la marche des voitures; enfin, lorsque la surface du terrain fait beaucoup d'ondulations, de permettre d'exécuter le chemin sans être obligé de creuser pour le mettre de niveau, plus que cela n'est indispensable pour rendre praticable le sentier dans lequel marche le cheval qui traîne la voiture.

Quand on se sert de chevaux, il est nécessaire d'avoir une corde de remorque qui leur donne la facilité de traîner la voiture sans que l'angle de

tirage puisse beaucoup varier; le poids même de cette corde sert en quelque sorte comme un ressort qui tend à régulariser les mouvemens des chevaux (*).

Nous pensons que ce genre de chemin paraîtra très supérieur à tous les autres, pour le transport des lettres et paquets et pour toutes les voitures légères, pour lesquelles la vitesse est l'objet le plus important, étant convaincus qu'il est avantageux pour ces sortes de voitures que la route se trouve assez élevée pour être exempte des interruptions continuelles auxquelles sont exposés les autres chemins en fer. Une voiture qui avance sur un chemin en fer avec une vitesse de plus de 6 milles (environ $2\frac{1}{2}$ lieues) par heure, doit être assez élevée pour qu'il ne soit pas possible de verser ceux qui la montent, ou d'être heurté par d'autres voitures. Une voiture qu'une force médiocre fait rouler avec rapidité sur une surface polie ne peut pas

(*) On peut voir, dans la description que M. Palmer a donnée de son invention, tous les détails qui s'y rapportent. Son ouvrage contient beaucoup d'expériences, et des remarques très judicieuses sur les chemins en fer en général. Il est enrichi de beaucoup de figures. Le titre est : *Description of a Rail-way on a new principle*. Il a été publié à Londres, chez Taylor.

être arrêtée subitement, et on ne saurait non plus changer sa direction; mais un chemin en fer élevé de 3 mètres au-dessus du sol d'un chemin ordinaire, ne pourrait être exposé à aucun accident semblable, à moins que ce ne fût par suite de négligence. Les voyageurs ne se trouveraient pas placés beaucoup plus haut que sur l'impériale d'une diligence ordinaire, et la voiture ne courrait pas le risque de verser. Une route de cette espèce serait plus qu'aucune autre exempte d'interruption, et l'on pourrait, avec une très petite dépense, obtenir une force suffisante pour procurer toute la vitesse nécessaire à tel but qu'on se proposerait: nous en ferons connaître les moyens dans notre quatrième chapitre. Il n'est pas douteux qu'on ne pût suspendre une voiture entre deux rangs de barres élevées à une hauteur quelconque au-dessus du sol; et cet arrangement conviendrait à certains égards, mais il serait bien plus dispendieux, les deux rangs devant être établis, avec beaucoup de solidité, à une distance partout égale. Quant à ce que, par la méthode de M. Palmer, la voiture se trouve divisée en deux parties, cette circonstance doit être plutôt regardée comme avantageuse qu'autrement.

CHAPITRE III.

Force nécessaire pour produire un effet donné sur un chemin en fer. — Résistance résultant du poids des roues. Expériences. — Résistance aux bords de l'ornière. — Résistance aux essieux des voitures. Expériences. — Du mouvement accéléré sur les chemins en fer. — Rapport du frottement à la pression. — Proportions des machines à vapeur locomotives pour les routes en fer à barres droites. — Inclinaison qui convient à la marche des chariots chargés. — Proportions des machines locomotives pour les routes dont les barres sont à crans. — Mouvement des voitures sur les routes en fer. — Remarques générales.

Les circonstances qui influent sur le mouvement des voitures d'un chemin en fer sont si nombreuses, qu'il est nécessaire, dans l'examen de ce sujet, de faire des divisions, et de ne s'arrêter qu'aux parties qui ont le plus d'importance, telles que la résistance qui résulte du poids des roues, celle qui a lieu à la surface de l'ornière, et enfin

celle qu'on observe aux essieux des voitures. Après avoir considéré ces trois sortes de résistance nous les comparerons, et nous déduirons de cet examen les maximes de pratique qui en sont la conséquence.

Résistance à raison du poids des voitures.

Si une roue est tenue en repos sur un plan incliné par une force P (fig. 33), agissant dans la direction PC, il est démontré en mécanique que le poids de la roue est à la force qui la retient comme AB est à BD.

Mais il faut une plus grande force que celle donnée par cette proportion pour faire monter la roue sur ce plan avec une vitesse uniforme, lors même qu'on le supposerait parfaitement dur et poli. En effet, si la force motrice était attachée au centre de la roue, sa vitesse serait nécessairement la même que celle de ce centre; mais les quantités de mouvemens dans la roue et la force motrice doivent être égales; et puisque chaque point de la roue, celui du centre excepté, décrit une ligne plus longue, il est évident qu'il se meut avec plus de vitesse que la force, et que par conséquent un surcroît de force motrice est nécessaire : nous allons chercher à en évaluer la quantité.

Chacun des points de la circonférence d'une

roue décrit une courbe, que les géomètres ont appelée une *cycloïde;* et en admettant que les longueurs des courbes décrites par les points intermédiaires, entre la circonférence et le centre, décroissent en raison de leur éloignement de la circonférence, la longueur de la cycloïde étant égale à 4 fois le diamètre du cercle générateur, la vitesse moyenne de la matière de la roue, en supposant que c'est un cylindre solide, sera représentée par $\frac{4+3,14}{2} = 3,57$, la vitesse de l'essieu étant de 3,14. Donc la puissance nécessaire pour tenir la roue en mouvement, est à celle qui ferait mouvoir la même quantité de matière réunie à l'axe de la roue, comme 1,13 est à 1; c'est-à-dire qu'elle est d'un peu plus d'un huitième plus forte. Dans les roues, une plus grande proportion de matière est réunie vers la circonférence; mais en raisonnant d'après l'évaluation précédente, il ne paraît pas qu'on dût, dans aucune circonstance, ajouter plus d'un cinquième au poids des roues pour avoir une masse équivalente à celle que l'on doit supposer être rassemblée au centre de la roue.

Les mêmes conséquences ont lieu pour les roues qui se meuvent sur un plan horizontal, quelles que soient leurs dimensions et leur nature.

Ire Expérience. Nous nous sommes proposé de constater par l'expérience la force nécessaire pour faire tourner des roues en fonte sur un chemin de niveau, et formé avec des barres de fer forgé. A cet effet, les roues ont été placées dans un essieu, au milieu duquel était fixé un rouleau de 30 millimètres de diamètre, entouré d'un fil fin et flexible, qui, passé dans une poulie, était tendu parallèlement au chemin à l'aide d'un poids suspendu à son extrémité. Le poids de deux roues de 100 millimètres et de l'essieu était de 53 onces (1486 grammes), et elles roulaient facilement sur les barres à l'aide d'un poids de 192 grains (12 grammes) (le frottement de la poulie avait été constaté par expérience, et on en avait tenu compte); et cette force était équivalente à 250 grains (16 grammes) agissant au niveau de l'axe. Ainsi la force motrice agissant au niveau de cet axe était la 93ᵉ partie du poids.

IIme Expérience. Le poids d'une paire de roues de 200 millimètres de diamètre, et de l'essieu, était de 119 onces (3341 grammes); et un poids de 250 grains (16 grammes), déduction faite du frottement de la poulie, les faisait rouler facilement. Ce poids est égal à 288 grains (18,5 gram.) appliqués à l'axe; c'est-à-dire que la force mo-

trice agissant au niveau de cet axe était de $\frac{1}{181}$ du poids (*).

Ainsi le rapport de la force motrice au poids de la roue est en raison inverse du diamètre de cette roue; car, dans ces deux expériences, les diamètres des roues sont comme 2 : 1 et $\frac{1}{98}$: $\frac{1}{181}$ à peu près comme 2 : 1.

Il paraît, d'après ces expériences, que l'effet des grandes roues, quant au retard qu'elles occasionent, ne peut que très peu influer sur le mouvement des voitures; et de plus, qu'on peut considérer le poids des roues comme faisant partie de la charge qui pèse sur les essieux, ce qui simplifie beaucoup toutes les recherches sur le mouvement des voitures, sans pouvoir conduire à aucune erreur qui mérite d'être prise en considération dans la pratique.

Résistance à la surface des ornières.

Il arrive souvent que la plus grande partie de la résistance dans l'ornière résulte du frottement

---

(*) Vitruve (liv. X, chap. 6) cite un appareil inventé par Paconius, pour transporter la base colossale d'une statue d'Apollon hors de sa carrière, dont la ressemblance avec celui dont nous nous sommes servi nous a frappé.

latéral des rebords qui forment l'ornière, soit que ces rebords tiennent aux roues, soit qu'ils fassent partie des barres droites dont se compose la voie. On doit donc chercher à faire tendre les roues à suivre leur direction, en n'ayant que le moins possible besoin d'y être maintenues par le bord de l'ornière.

Ce but peut être rempli par les voitures dont les roues portent les rebords qui s'emboîtent dans les barres des routes à ornières étroites, en faisant le bord des roues légèrement conique ou plutôt courbé, comme on le voit figure 24. La voiture retournera alors d'elle-même à sa vraie situation sur la voie, lorsqu'elle en aura été écartée par accident.

Dans les chemins en fer à ornières plates, où les barres ont un renflement qui sert à retenir les roues, la forme des barres pourrait être la même que celle dont on vient de parler pour le bord des roues des chemins à ornières étroites, ce qui donnerait aux roues une tendance à s'écarter du rebord; ici la résistance est considérablement

---

Avec un chemin en fer Paconius aurait pu sans difficulté maintenir sa machine dans une direction convenable.

augmentée, quand les roues frottent contre les renflemens.

Les chemins en fer, suivant le système de M. Palmer, ne sont exposés qu'à très peu de frottement latéral. La forme qu'il propose pour le bord supérieur de la barre, est celle d'un segment de cercle aplati; le bord des roues doit être concave, et offre à peu près la même courbure. Il ne pouvait, à notre avis, choisir une forme plus propre à éviter les frottemens.

Des matières étrangères accidentellement déposées sur la superficie des barres, ou bien quelque inégalité dans les joints, peuvent occasioner une autre espèce de résistance. Parfois cela peut avoir l'effet qu'un obstacle élevé sur un chemin ordinaire aurait sur le mouvement d'une voiture; dans ce cas, les grandes roues sont plus avantageuses que les petites.

Si l'on nomme R le rayon de la roue, et x la hauteur de l'obstacle, P la force motrice et w le poids de la charge sur l'essieu, alors $R - x$ sera la longueur du levier avec lequel la puissance agit pour forcer la roue à surmonter l'obstacle, et $\sqrt{2Rx - x^2}$ sera égal à la longueur du levier avec lequel la charge agit pour résister à la force motrice; par conséquent

$$\frac{w\sqrt{2Rx - x^2}}{R - x} = P.$$

Il paraît donc que la force nécessaire pour élever une roue au-dessus d'un obstacle d'une hauteur déterminée est presque en raison inverse de la racine carrée du rayon de la roue, et qu'une roue de 4 pieds de diamètre n'aurait besoin pour surmonter un obstacle que de la moitié de la force qui serait nécessaire pour qu'une roue d'un pied de diamètre remplît le même objet.

Quand les roues et les barres sur lesquelles elles se meuvent sont proportionnées de manière que la pression n'occasione aucune altération permanente sur la surface des unes ou des autres, alors la résistance qui résulte de la pression de ces surfaces à l'instant de leur contact, se trouve presque entièrement contre-balancée par le ressort des surfaces qui se séparent, et il ne peut y avoir que très peu de force de perdue; mais dans le cas d'une altération permanente dans les surfaces, ou lorsque la poussière ou toute autre matière adhérente à la roue se trouve en contact avec les barres, alors la résistance devient considérable.

Nous pouvons, dans l'un et l'autre cas, attendu la petitesse de x, réduire l'équation précédente à $\frac{w\sqrt{2Rx}}{2} = P$. Mais x doit être directement pro-

portionnel à w, et à peu près en raison inverse de rayon. Ainsi on a

$$x = \frac{w}{R} \text{ et } \frac{w\sqrt{2w}}{R} = P \text{ ou } \frac{w^{\frac{3}{2}}}{R} = P.$$

Il paraît donc que s'il se trouve une résistance à la surface du chemin provenant d'une des causes que nous venons d'indiquer, elle augmente dans un rapport plus grand que celui de l'augmentation de la charge, c'est-à-dire comme la racine carrée du cube du poids. Et comme il se trouve toujours presque inévitablement une résistance de cette nature sur les routes à ornières plates, il est évident qu'on doit, pour bien faire, suivre dans la pratique le principe qui veut qu'on divise autant que possible la pression sur ces sortes de chemins. Mais dans ce cas aussi les grandes roues sont avantageuses, la force nécessaire pour vaincre la résistance étant en raison inverse du rayon de la roue.

La résistance que cause la poussière est plus grande qu'on ne le croirait. M. Palmer a fait pour la connaître une expérience sur le chemin à ornières plates de Cheltenham, de laquelle il résulte qu'il faut 19 $\frac{1}{2}$ pour 100 d'augmentation de force pour traîner les mêmes chariots lorsque l'ornière

est couverte de poussière, que lorsqu'elle est nette (*).

La poussière et la boue ne s'accumulent pas si facilement sur les chemins en fer à ornières étroites; mais quand cela a lieu sur ceux où l'on emploie des chariots dont les roues sont petites, elle occasione tant de retard que ceux qui soignent ces routes ont l'attention de faire conduire de l'eau en avant des trains de chariots pour arroser et nettoyer la voie. C'est ce qui a lieu, ainsi que l'a remarqué M. Palmer, sur le chemin en fer qui conduit aux carrières à ardoises de Penrhyn. Sur d'autres routes dont les roues sont plus grandes, et les barres qui forment les deux côtés de la voie sont plus éloignées, on n'est pas dans la nécessité de recourir à cet expédient.

Il doit paraître évident que, quelle que soit la quantité de résistance à la surface des ornières et des rebords, cette résistance est de telle nature qu'il n'est pas facile de la soumettre au calcul; elle dépend en grande partie de la manière dont le chemin est exécuté, et beaucoup aussi de l'état dans lequel il est entretenu. Nous n'avons voulu ici que faire voir quelles circonstances peuvent influer sur la diminution de cette résistance.

(*) *Description of a Rail-way*, pag. 16.

Résistance aux essieux des voitures.

Nous avons réservé pour être examinée la dernière, cette partie de la résistance qui consume le plus de force motrice sur les chemins en fer. C'est un sujet qu'il nous serait impossible de traiter convenablement sans le secours de l'expérience et du raisonnement mathématique; mais nous nous proposons de réunir nos recherches mathématiques dans des paragraphes séparés, afin que le commun des lecteurs puisse passer les détails algébriques sans autre peine que celle de tourner les pages qui les renferment.

La pression sur les parties qui exercent un frottement à l'essieu d'un chariot est proportionnelle au poids du corps de ce chariot et à la charge ajoutée à l'effort de la puissance qui le met en mouvement. Cette pression a lieu dans la direction de la résultante de ces forces. Mais l'effort qui produit un frottement sur l'essieu peut être considéré comme étant dans une direction verticale, et égal au poids du chariot et de sa charge réunis, parce qu'on ne peut pas commettre une erreur sensible dans la pratique en ne tenant pas compte de cette

partie de la puissance qui surmonte le frottement (*).

On a trouvé, par expérience, que le frottement des corps qu'on emploie comme essieux et celui de leurs supports est, à circonstances égales, presque proportionnel à la pression.

La pression, sur le chemin même, sera toujours plus grande que celle qui s'exercera sur l'essieu, à raison de l'effort dépendant du poids des roues; c'est pourquoi, si l'ornière qui porte les roues n'est pas plus lisse que la surface de l'essieu, la roue ne pourra pas glisser sur elle.

Mais le centre du mouvement est en C (fig. 34), centre de l'essieu; supposons que CB soit la direction de la force, et EA la direction de la résistance au frottement à la surface de l'essieu, le frottement sur l'ornière, en D, empêchant la roue de glisser sur elle.

Maintenant, concevons que la force fasse mouvoir la roue en avant; alors il est évident que le frottement en D agit avec le bras de levier DC, pour faire tourner la roue sur son axe, tandis que

(*) Celui qui voudrait approfondir cette question pourrait consulter le *Traité de Mécanique* de Poisson, tom. I, art. 130.

le frottement de l'axe en A n'agit qu'avec le bras de levier AC, rayon de l'axe, pour résister à l'effort de la force motrice. Il est clair, d'après cela, qu'en ne considérant que ce qui se rapporte au frottement de l'essieu, si l'on double le rayon de la roue, on diminue de moitié la force nécessaire pour mettre le chariot en mouvement, et qu'on la réduit dans une proportion analogue pour toute autre augmentation du rayon de la roue; car le même essieu peut porter une même charge, quelle que soit la grandeur des roues.

C'est une vérité qu'on a souvent publiée en Angleterre, et il est assez singulier qu'elle ait échappé à l'attention de plusieurs écrivains qui se sont occupés des voitures à roues, même de ceux qui ont fait des expériences. Dans les descriptions qu'ils ont données de ces expériences, on ne trouverait peut-être pas un seul exemple où le rapport du diamètre de la roue à celui de l'essieu soit indiqué.

S'il est satisfaisant d'être conduit à une vérité utile par le raisonnement, il l'est encore plus de voir cette vérité confirmée par l'expérience. J'ai donc fait construire un petit chariot avec des roues de deux sortes. Le diamètre des unes était double de celui des autres. Les essieux étaient en fer et tournaient dans des boîtes de cuivre, de manière

qu'en changeant les roues, il n'y avait aucun changement dans les surfaces sur lesquelles les frottemens s'exerçaient. Les roues étaient en fer coulé, leurs bords travaillés avec le tour; les petites avaient 100 millimètres de diamètre, les grandes 200. Le diamètre des essieux était de 14 millimètres. Le chemin en fer avait 3 mètres et demi de longueur, et consistait en deux barres de fer encastrées dans deux pièces de bois de sapin de 114 millimètres d'épaisseur, et assemblées à une distance l'une de l'autre, telle que les roues du chariot se trouvaient portées par les barres. Le bord supérieur des barres de fer avait été dressé à la lime et bien poli. J'eus ainsi un chemin en fer que je pouvais placer de niveau ou à tel degré d'inclinaison que cela me conviendrait. Je fis les expériences dont je vais donner le détail, sur ce chemin placé de niveau : les essieux du chariot avaient été préalablement frottés avec de l'huile d'olive.

Expérience III. On mit au chariot les roues de 100 millimètres de diamètre, et on le chargea jusqu'à ce qu'un poids de deux livres passé sur une poulie, et tirant dans une direction parallèle à la voie, produisît un mouvement régulièrement accéléré sur les barres, mouvement qui fit parcourir aux roues 91 centimètres dans les 9 premières

secondes. Le poids total du chariot et de la charge était de près de 55 kilogrammes, et l'effet du frottement sur la poulie, vérifié par moi, était de 0,025 kil., le chariot allant avec cette vitesse; de sorte que la force motrice était de 0,88 kil.; mais $\frac{55}{0,88} = 62$ à peu près, c'est-à-dire que la charge était mise en mouvement par la soixante-deuxième partie de son poids.

On mit alors un moteur du poids de 4 livres (1,818 kil.), et l'on augmenta la charge jusqu'à ce que le même espace se trouvât décrit dans le même temps ou dans un temps aussi rapproché de l'autre que cela fut possible. Quand cela eut lieu, le poids total du chariot et de la charge se trouva être de 230,5 livres (104,58 kil.), et la force motrice de 3,886 livres (1,766 kil.). La force motrice n'était donc que d'environ la cinquante-neuvième partie de la charge.

Il paraît, d'après cette expérience, que la résistance n'est pas exactement proportionnelle à la pression.

Expérience IV. On retira les roues de 100 millimètres; on mit en place celles de 200, et l'on arrangea la poulie de manière à rendre parallèle aux barres du chemin la ligne de tirage. On y suspendit le poids de 2 livres (0,907 kil.), et l'on

augmenta la charge jusqu'à ce que les premiers 3 pieds (91 centimètres) fussent décrits en 9 secondes. Elle se trouva alors, chariot et roues compris, de 219,75 liv. (99,54 kil.). La force motrice, déduction faite du frottement de la poulie, était de 1,943 liv. (0,88 kil.). La force motrice était donc à peu près la cent-treizième partie du poids, ou la charge était mise en mouvement par la cent-treizième partie de son poids.

Ce rapport ne s'accorde pas exactement avec le rapport des diamètres des roues; en effet, il diffère d'un dixième, si on le compare avec l'expérience dans laquelle la pression était de 55 kilogrammes, et d'un vingtième, comparé à l'expérience où l'on a trouvé 104,53 kilogrammes pour la pression totale. Reste à déterminer si cette différence a pour cause la résistance à la circonférence, ou bien le frottement vers l'axe.

Quand on eut augmenté la charge jusqu'à ce qu'une force motrice de 3 livres (1,36 kil.) eût produit la même vitesse dans le même temps, le poids total se trouva être de 320 livres (145 kil.). Ainsi, cette charge se trouva mise en mouvement par environ la cent-septième partie de son poids.

Dans ce cas encore, il paraît qu'au moins quelque partie de la résistance augmente dans un rapport plus grand que la pression.

Nous avons vu qu'une charge de 104,53 kilogrammes avait été mise en mouvement par un poids de 1,8 kil. ou 18 hectogrammes, avec des roues de 100 millimètres, et qu'un poids de 99,54 kil. l'avait été par 9 hectogrammes, avec des roues de 200 millimètres; et comme ces expériences ont été très souvent recommencées, et que les variations ont été aussi peu considérables qu'on pouvait l'espérer, lorsque l'on parvenait à faire coïncider le moment où battait un pendule avec celui où le chariot frappait contre un léger obstacle placé à dessein, précisément au 91e centimètre du chemin, nous pensons qu'on peut admettre que sur un chemin de fer, la force qui peut mettre une voiture en mouvement, la charge et les essieux étant les mêmes, est en raison inverse du diamètre des roues.

Nous allons reprendre cet examen dans une forme plus générale, et nous supposerons toujours que la force agit dans une direction parallèle aux barres sur lesquelles tournent les roues, et de niveau avec l'axe. Soit donc AB (fig. 35) une ligne horizontale, CB l'inclinaison des barres, P*c* la direction du moteur. Appelons P la force motrice, W le poids du chariot et de la charge, F la résistance par le frottement qui se fait à l'essieu, et *i* l'angle d'inclinaison ABC. Alors P — F = la par-

tie de la force employée à faire monter la voiture sur le plan incliné; mais $cC : ca :: W : P - F$, et les triangles aCc et ABC sont semblables, puisqu'ils sont rectangles tous les deux, on a donc

$$CB : AC :: W : P - F,$$

ou, parce que $\frac{AC}{BC} = \sin i$, on a

$$W . \sin i = P - F, \text{ et } W . \sin i + F = P.$$

Mais F est proportionnel à la pression produite sur l'axe par ces forces. Maintenant, nommons R le rayon des roues, r le rayon des essieux, et f le frottement, quand la pression est représentée par l'unité. La pression sur l'axe est la résultante des forces aC et ac. Mais

$$aC = W . \cos i, \text{ et } ac = W . \sin i,$$

et les forces étant à angles droits

$$W \sqrt{\cos^2 i + \sin^2 i} = \text{la résultante ;}$$

mais celle-ci est égale à W, donc $F = \frac{Wfr}{R}$, et par conséquent, $W\left(\sin i + \frac{fr}{R}\right) = P =$ la force qui peut remonter un chariot sur un plan incliné; et $W\left(\sin i - \frac{fr}{R}\right) =$ la force qui fait tendre le chariot à descendre, et qui devient zéro quand $\sin i = \frac{rf}{R}$.

Lorsque sin i est plus petit que $\frac{fr}{R}$, on a

$W\left(\frac{fr}{R}-\sin i\right)=P=$ la force qui peut mouvoir un chariot sur un plan incliné.

Dans la dernière équation, quand $\frac{fr}{R}=\sin i$, on a $P=o$; c'est-à-dire que le chariot descendrait par l'effet de son propre poids. Ceci nous fournit un moyen pratique facile pour déterminer le frottement : il ne faut que donner aux barres qui forment le chemin une inclinaison suffisante pour que le chariot se mette simplement en mouvement; alors le frottement sera exprimé par le sinus de l'angle d'inclinaison.

Enfin, quand le chemin est de niveau..... sin. $i=o$ et $W\,\frac{fr}{R}=P$; ce qui donne la force motrice égale à la résistance ou au frottement : et comme nos expériences ont été faites de cette manière, nous avons la facilité de comparer les deux modes d'expérience.

Expérience V. L'inclinaison de notre chemin de fer fut augmentée jusqu'à ce que le chariot avec ses roues de 200 millimètres pût descendre d'un mouvement continu, en portant une charge de 25,40 kilogrammes. Le poids du chariot et

des roues était de 11,66 kilogrammes ; le mouvement se ralentissait sensiblement quand on ajoutait 39 kilogrammes à la charge, mais il était toujours aussi régulier ; et quand on ôtait toute la charge, le chariot roulait très-facilement, mais avec une vitesse moyenne qui n'allait pas à plus de 300 millimètres par seconde ; il en fallait 9 ou 10 pour qu'il parcourût 2,75 mètres. L'inclinaison mesurée fut trouvée de près de 45 millimètres sur un espace de 3,656 mètres, mesuré sur l'inclinaison. On a ici presque $\frac{1}{68}$ du poids pour la force motrice. Le mouvement n'était pas assez régulièrement accéléré pour permettre aucune comparaison par ses lois.

Expérience VI. On mit au chariot les roues de 100 millimètres de diamètre au lieu de celles de 200 millimètres, et l'on remarqua qu'il ne se mit pas en mouvement tant qu'on ne changea pas l'inclinaison, à moins qu'on n'augmentât la charge. Ce ne fut que lorsque l'inclinaison eut été portée à 85 millimètres sur le même espace de 3,656 mètres, mesurés sur les barres, que le chariot put se mouvoir avec la même vitesse que dans l'expérience précédente : de sorte que la force était égale au trente-sixième du poids. En ajoutant à peu près 62 kilogrammes au poids du chariot, le mouvement était ralenti. Le poids du

chariot avec les petites roues était, à très peu près, de 8 kilogrammes.

Il paraît, d'après ces expériences, que la résistance ne diminue pas tout-à-fait de la moitié quand on double le diamètre des roues ; mais la différence n'est pas de plus d'un dix-huitième de cette proportion. La résistance, et principalement celle des rebords, était ici beaucoup plus grande que dans les expériences faites sur le chemin placé de niveau.

Expérience VII. L'inclinaison fut augmentée jusqu'à ce que le sinus de l'angle fût de 0,039, et le temps de la descente fut compté avec un pendule à secondes, l'espace décrit étant plus ou moins long, parce qu'il fallait que le chariot touchât le bloc à la partie la plus basse du chemin. Avec les roues de 100 millimètres et une charge de 18 kilogrammes, le chariot parcourut 2,7 mètres en 5 secondes, et 1 mètre 5 millimètres en 3 secondes. Ainsi les espaces parcourus ont été presque comme le carré des temps.

Expérience VIII. Avec les roues de 200 millimètres et une charge de 18 kilogrammes, le chariot parcourut 7,7 pieds (2,34 mètres) en 4 secondes.

Si l'on veut comparer ces expériences avec les premières, il est nécessaire de se servir des for-

mules de la descente des corps sur des plans inclinés. Les quatre que voici sont les plus utiles :

$$1 \ldots s = 16\tfrac{1}{12}\,pt^2 = \frac{v^2}{64\frac{1}{3}\,p},$$

$$2 \ldots v = \frac{2s}{t} = \sqrt{64\tfrac{1}{3}\,ps},$$

$$3 \ldots t = \frac{v}{32\frac{1}{6}\,p} = \sqrt{\frac{s}{16\frac{1}{12}\,p}},$$

$$4 \ldots p = \frac{s}{16\frac{1}{2}\,t^2} = \frac{v}{32\frac{1}{6}\,t};$$

équations dans lesquelles s désigne l'espace décrit en pieds, v la vitesse acquise aussi en pieds par seconde, t le temps en secondes, et la force qui agit constamment sur le corps mu en parties de son poids.

Dans l'application de ces formules, nous négligerons les fractions; nous ne les avons rapportées que pour mettre ceux qui le jugeraient nécessaire en état de les employer.

Nous avons fait voir que $W\left(\sin. i - \frac{fr}{R}\right)$ est égal à la force qui fait descendre un chariot sur un plan incliné; par conséquent $p = \sin. i - \frac{fr}{R}$, d'où l'on tire par la formule 4, $\sin i - \frac{fr}{R} = \frac{S}{16\,t^2} = \frac{fr}{R}$.

Dans les expériences précédentes sin. $i = 0{,}039$ et dans la septième, $s = 8{,}9$ pieds (2,7 mètres) et $t = 5$ secondes.

$$\text{Donc } 0{,}039 - \frac{8{,}9}{16 \times 25} = 0{,}01666 = \frac{1}{60}.$$

La seconde expérience dans laquelle........ $s = 3{,}3$ pieds (1,05 mètres) et $t = 3$ secondes, donne $\frac{fr}{R} = 0{,}016 = \frac{1}{62{,}5}$.

Dans la huitième expérience, $s = 7{,}7$ pieds (2,34 mètres) et $t = 4$ secondes; ainsi

$$0{,}039 - \frac{7{,}7}{16 \times 16} = 0{,}0089 = \frac{1}{112} \text{ à peu près.}$$

Ces expériences donnent donc des résultats qui se rapprochent beaucoup de ceux des expériences III et IV; mais la pression était bien moins forte, et le mode de l'expérience ne nous permettait pas de la rendre plus considérable.

Nous avons maintenant à considérer le rapport du frottement à la pression, tel qu'il résulte de ces expériences; et puisque le diamètre de l'essieu $= 0{,}55$ pouces anglais (14 millim.) et celui de la roue $= 4$ pouces (100 millim.), on a, en mesures métriques, quand toute la résistance est de $\frac{1}{60}$,

$$\frac{fr}{R} = \frac{f \times 14}{100} = \frac{1}{60} \text{ ou } f = \frac{100}{840} = 0{,}119.$$

Dans l'expérience avec les roues de 200 millimètres, nous avons eu

$$\frac{f \times 14}{200} = \frac{1}{113} \text{ à peu près, ou } f = \frac{1582}{200} = 0,126.$$

Le milieu entre ces deux résultats est 0,122, un peu moins d'un huitième. C'est là le frottement auquel on doit s'attendre dans la pratique, car nous avons évité dans la construction de notre appareil de lui faire donner plus de fini et de perfection que n'en peuvent avoir les machines destinées à servir en grand.

Expérience IX. Afin de pouvoir évaluer le frottement de l'axe, indépendant du frottement du chemin, on renversa le chariot et on le plaça sur un banc avec une paire de roues qui ressortaient sur le côté; l'autre bout du chariot était solidement retenu. On mit au-dessus de chaque roue une bande plate et flexible; et l'on suspendit un bassin de balance de chaque côté des deux bandes. L'addition d'une cent-vingtième partie au poids produisit un mouvement lent, mais régulier, avec une pression de 27 kilogrammes, et avec une pression double ou de 54 kilogrammes. Et quoiqu'il y eût un changement sensible dans la vitesse du mouvement quand la pression était la plus grande, ce changement n'était pourtant

pas assez considérable pour mériter qu'on y fasse attention dans la pratique. Si nous voulons ne pas avoir égard à la roideur des bandes, nous aurons pour l'expression du frottement à l'essieu

$$f = \frac{200}{14 \times 120} = \frac{1}{8} \text{ à peu près.}$$

Il est clair, d'après cette expérience, que la résistance sur le chemin en fer est presque nulle quand il est bien égal, bien poli et propre. On peut donc, dans les recherches relatives au mouvement des voitures sur un chemin en fer, se borner à celles qui ont rapport à la résistance qui s'exerce à l'essieu.

Proportions des machines locomotives pour les routes en fer unies.

Lorsqu'une machine locomotive est employée à conduire un train de chariots sur un chemin en fer dont les barres ne sont pas à crans, son poids doit être assez grand pour produire autant de frottement sur la surface du chemin qu'il en faut pour que sa quantité soit égale à la force nécessaire pour mettre le train en mouvement; car si le frottement était moindre, les roues tourneraient sans que le chariot avançât.

Soit E le poids du chariot qui porte la ma-

chine, f' le frottement quand la pression égale 1 ou l'unité, et i l'angle d'inclinaison.

D'après les principes de Mécanique, E cos. i = la pression sur le plan, et Ef' cos. i le frottement.

Supposons que le train suive la descente, et que le poids de tous les chariots qui le composent soit avec celui de leurs charges $= w$. Alors on a (équation à la page 72) $w\left(\frac{fr}{R} - \sin. i\right) =$ la force qui peut mettre le train en mouvement. On a par conséquent :

$$Ef' \cos. i = w\left(\frac{fr}{R} - \sin. i\right);$$

$$\frac{E}{w} f' \cos. i = \frac{fr}{R} - \sin. i.$$

Mais pour des angles aussi petits le cosinus ne diffère pas sensiblement du rayon, et l'on peut en conséquence supposer dans la pratique

$$\frac{fr}{R} - \frac{E}{w} f' = \sin. i = \text{l'angle d'inclinaison};$$

$$\frac{Ef' \cos. i}{\frac{fr}{R} - \sin. i} = w = \text{le poids du train de chariots.}$$

et $\frac{w}{f' \cos. i}\left(\frac{fr}{R} - \sin. i\right) = E$, ou le poids du chariot à vapeur.

Quand le chemin est de niveau, alors cos. i

$= 1$ et $\sin i = 0$. Dans ce cas, on a pour le poids du train de chariots

$$w = \frac{Ef\,r}{fr},$$

et pour le poids du chariot à vapeur,

$$E = \frac{wfr}{f'R}.$$

Afin de déterminer la valeur de f', nous avons fait l'expérience suivante :

Expérience X. Nous avons arrêté les roues de notre chariot de manière à ce qu'elles ne pussent point tourner, et nous avons augmenté l'inclinaison du chemin en fer jusqu'au point où le chariot a pu simplement glisser sur le bord de ses roues. La tangente d'inclinaison était alors $= 0,165 = \frac{1}{6,06}$, ou bien le frottement était à très peu près égal à $\frac{1}{6}$ de la pression, dans ce cas où du fer coulé glissait sur du fer forgé, l'un et l'autre rendus assez lisses par l'usage. Mais pour un cas semblable, dans la pratique, on ne devrait pas évaluer si haut le frottement, et on pourrait ne le porter qu'au douzième de la pression, attendu que les surfaces deviennent, par l'usage, polies comme du verre et très glissantes.

En prenant ce dernier nombre et en faisant le rapport du frottement à la pression vers l'essieu $= \frac{1}{8}$, nous aurons

$\frac{r}{8R} - \frac{E}{12w} =$ le sinus d'inclinaison du chemin.

$\frac{\frac{1}{12} E \cos i}{\frac{r}{8R} - \sin i} = w$; poids du train de chariots, et

$\frac{12w}{\cos i}\left(\frac{r}{8R} - \sin i\right) = E$, poids du chariot à vapeur.

Exemple. Soit le poids d'un chariot à vapeur de 8000 kilogrammes ou de 8 tonneaux, et le poids total d'un train de chariots de 98 tonneaux; le diamètre des essieux des chariots de 76 millimètres, celui des roues de 914 millimètres; alors l'équation $\frac{r}{8R} - \frac{E}{12w}$ donne

$$\frac{76}{8 \times 914} - \frac{8}{12 \times 98} = \frac{1}{277} \text{ à peu près;}$$

et si la descente est moindre que cette proportion, les roues tourneront sans que les chariots avancent.

Si les chariots doivent remonter sur un plan incliné, la formule deviendra $\frac{E}{12w} - \frac{r}{8R} =$ le sinus de l'angle d'inclinaison.

$$\frac{\frac{1}{12} E \cos i}{\frac{r}{8R} + \sin i} = w, \text{ et } \frac{12w}{\cos i}\left(\frac{r}{8R} + \sin i\right) = E.$$

Exemple. Supposé que les chariots étant vides, et leur poids total dans cet état de 26 tonneaux, on veuille les remonter sur le chemin en fer; dans ce cas

$$\frac{8}{12 \times 26} - \frac{76}{8 \times 914} = \frac{1}{39} - \frac{1}{96,2} = \frac{1}{66}.$$

Ces exemples prouvent évidemment qu'un degré considérable d'inclinaison est favorable à l'action des machines locomotives qui conduisent des voitures en descendant. Mais la pente la plus convenable pour une route inclinée est celle qui rend une même force motrice applicable à la montée comme à la direction contraire; le poids de la machine doit être calculé pour la rendre propre à conduire les voitures qui remontent, car alors il sera convenable pour celles qui descendent.

Supposons un convoi de marchandises conduit à la descente, et dont le poids, y compris celui des chariots, soit représenté par w; supposons un convoi qui remonte, et dont le poids avec celui des voitures soit égal à nw. Alors, pour que la conduite puisse se faire dans les deux directions avec la même force, il faut qu'on ait (page. 73)

$$w\left(\frac{fr}{R} - \sin i\right) = nw\left(\frac{fr}{R} + \sin i\right),$$

ou $$\frac{fr}{R} - \sin i = \frac{nfr}{R} + n \sin i;$$

6..

d'où l'on tire $\frac{fr(1+n)}{R(1+n)} = \sin \iota$.

Si les chariots ne doivent pas retourner, alors on a $n = 0$ et $\frac{fr}{R} = \sin i$.

Et quand $n = 1$, ou quand le poids des marchandises est le même dans les deux directions, $\sin i = 0$.

Les mêmes formules s'appliquent aux plans inclinés quand les voitures qui descendent doivent être complètement chargées, et quand celles qui remontent ne doivent l'être que légèrement.

Lorsqu'on ne doit remonter que les chariots vides, alors nw doit être égal au poids des chariots; et le rapport le plus général entre le poids des chariots et celui des charges étant celui de 1 à 4, on a $n = 0{,}25$; et f étant égal à $\frac{1}{8}$, on a

$$\frac{0{,}6r}{8R} = \sin i = \frac{0{,}3r}{4R}.$$

Si le diamètre de l'essieu est de 76 millimètres, et celui de la roue de 914 millimètres, alors $\frac{r}{R} = \frac{1}{12}$ à peu près, et

$$\frac{0{,}3r}{4R} = \frac{1}{160} = 0{,}00625.$$

Proportions des machines locomotives, quand elles conduisent sur un chemin dont les barres sont à crans.

Nous allons examiner maintenant le poids que doit avoir une machine qui fait tourner des roues sur des barres de fer à crans. La meilleure manière de faire les crans est de les arrondir, de manière que les concavités soient égales aux convexités dans toute la longueur du chemin. Buchanan a donné, dans son Essai sur la construction des moulins, le moyen pratique de les tracer. (Seconde édition, vol. I, p. 86.) En supposant que les crans soient faits de cette manière, les surfaces des dents en contact feront, avec le bord supérieur des barres du chemin, un angle dont le cosinus sera égal à la moitié de la hauteur des crans, et dont le rayon sera le rayon de la roue. Nommons a cet angle, et i l'angle d'inclinaison des barres qui forment le chemin en fer; que E soit le poids de la machine, f' le frottement lorsque la pression est représentée par l'unité, et P la force nécessaire pour mettre en mouvement le train de chariots.

Alors E cos $i =$ la pression de la machine dans une direction perpendiculaire aux barres du che-

min; ce qui donne $E \cos i\,(f' \cos a + \sin a) =$ la force qui retient la machine dans les crans du chemin; et $P\,(\cos a - f' \sin a) =$ la force qui tend à faire sortir de ces crans les crans correspondans de la machine; on a donc........ $E \cos i\,(f' \cos a + \sin a) = P\,(\cos a - f' \sin a)$ quand ces forces sont en équilibre. De cette équation nous tirons :

$$\frac{P}{\cos i}\left(\frac{\cos a - f' \sin a}{f' \cos a + \sin a}\right) = E, \text{ poids de la machine},$$

et

$$\frac{P - Ef' \cos i}{Pf' + E \cos i} = \text{tang } a;$$

équation dans laquelle il est évident que si $Ef' \cos i$ devient égal à P, la tangente a devient 0; ce qui fait voir que le seul frottement sur les barres suffit pour empêcher les roues de tourner. Mais toutes les fois que la quantité $Ef' \cos i$ est plus petite que P, des crans sont nécessaires, et alors la roue doit être telle que la moitié de la hauteur des crans soit au rayon comme le cosinus de a est à l'unité. Ceci détermine donc la grandeur de la roue, car la hauteur des dents est déterminée par la force qu'elles doivent avoir (*).

(*) *Voyez* l'ouvrage de Tredgold, sur la force du fer coulé, art. 120 et 121, où il traite de la force des dents des roues, etc. Paris, 1825, chez Bachelier.



Du mouvement des voitures sur un chemin en fer.

Lorsqu'une voiture est traînée par un cheval, il a la faculté de proportionner sa force aux circonstances; et lorsqu'il est question de la faire mouvoir au moyen de quelque agent mécanique, il faut aussi ménager une puissance analogue qui en varie la force. L'utilité de cette faculté de varier la force se montre particulièrement lorsqu'il faut faire partir et lorsqu'il faut arrêter un train de chariots. La puissance que nous avons désignée par P dans les recherches précédentes, est celle qui se trouve équivaloir précisément à la force nécessaire pour tenir les chariots en mouvement à un degré de vitesse quelconque. Il faut donc une seconde force p pour engendrer une nouvelle vitesse, ou pour détruire la vitesse acquise, suivant l'occasion. Alors $P + p$ sera la force totale de l'agent; et si c'est une machine locomotive qui en serve, on trouvera qu'il est bon que $p = P$, c'est-à-dire que la seconde force soit égale à la première, ou que la plus grande force de la machine soit le double de celle avec laquelle elle agit ordinairement. Pour d'autres cas, cela n'est pas nécessaire.

Si l'on veut savoir quel temps est nécessaire pour

engendrer la vitesse avec laquelle les chariots doivent se mouvoir, appelant p la force accélératrice comptée en parties du poids, v la vitesse à engendrer exprimée en pieds par seconde, et t le temps en secondes; on aura par la formule 3 (page 76), $t = \frac{v}{32 \frac{1}{2} p}$.

Exemple. Supposons qu'une voiture doive se mouvoir avec une vitesse de 6 pieds anglais (1829 millimètres) par seconde, et que l'excès de force soit équivalent à $\frac{1}{200}$ de son poids.

Ici le temps pour engendrer le mouvement sera exprimé par $\frac{v}{32 p}$, en négligeant la fraction $\frac{1}{2}$ du diviseur, et $\frac{6 \times 200}{32} = 37 \frac{1}{2}$ secondes.

Si l'on veut savoir quel espace le chariot doit parcourir pour acquérir la vitesse, on le trouvera par la formule 1 (page 76), où s désignant l'espace en pieds, $s = \frac{v^2}{64 p}$.

Exemple. Si un chariot doit aller avec une vitesse moyenne de 6 pieds anglais par seconde (1829 millimètres), ce qui ne fait guère plus de 4 milles (6,5 kilomètres) par heure, quel espace doit-il parcourir pour acquérir cette vitesse, l'excès de force de la machine étant supposé de $\frac{1}{200}$ du poids de la masse mise en mouvement?

Ici $\frac{v^2}{64p} = \frac{36 \times 200}{64} = 112$ pieds et demi, ou 34 mètres à peu près.

Ceci fait aussi connaître la distance que parcourait le chariot avant que sa vitesse ne fût détruite. En substituant, au lieu de $\frac{1}{200}$, le rapport $\frac{1}{25}$, qui est à peu près égal à la résistance sur une route ordinaire, nous trouverons que cet espace n'est que de 14 pieds, ou un peu plus de 4 mètres. On concevra par là la difficulté de prévenir sur un chemin en fer les accidens qui pourraient résulter des obstacles qu'y rencontreraient des voitures allant avec beaucoup de rapidité; car il serait impossible, sur la surface unie de ces chemins, de les arrêter subitement.

Remarques générales. Nous avons supposé le frottement de $\frac{1}{8}$ de la pression, quoique nous ne doutions nullement qu'on ne puisse le diminuer considérablement, tant par la perfection du travail que par le choix des substances employées à graisser les parties des machines qui se meuvent. Un chariot choisi et arrangé exprès pour faire des expériences, ne donnera jamais une mesure bien exacte de la résistance sur un chemin en fer; cependant, nous ne connaissons pas d'autre moyen pratique de la mesurer mieux. Aussi quand nous avons emprunté à l'expérience une proportion au

moyen de laquelle nous pussions mesurer la puissance des machines, la charge des chevaux et la force des régulateurs, nous n'avons pas cru qu'il pût être en auçune manière désirable de calculer d'aprés la plus petite résistance. L'usage de nos recherches pour évaluer les frais de transport sur les chemins en fer peut être aussi fort avantageux; mais ici comme dans les autres cas, la base du calcul doit être un terme moyen, et non pas le plus petit terme possible.

Dans les ouvrages nouvellement publiés sur les chemins en fer, le frottement a été évalué à la quantité la plus faible possible; mais ayant réduit la question au simple rapport du frottement à la pression, il est facile de comparer les résultats avec d'autres expériences (*). Les ouvrages auxquels nous faisons allusion ont attiré puissamment l'attention publique; il n'en est que plus nécessaire de bien examiner si les espérances qu'ils donnent sont fondées, et jusqu'à quel point elles le sont.

(*) Physique du docteur Young. (Vol. II, pag. 170.) Docteur Brewster's Encyclop., art. *Mechanics*, pag. 507, ou la troisième édition de *Fergusson's Lectures*, vol. II, pag. 164.

CHAPITRE IV.

Des moteurs pour les chemins en fer. — Force du cheval. — Durée de la journée de travail. — Maximum d'effet utile. — Force du cheval à différentes vitesses. — Machines locomotives. — Haute pression. — Son danger. — Puissance des machines à vapeur à haute pression. — Quantité de charbon qu'elles consomment. — Maximum de l'effet utile des machines à vapeur. — Machines à basse pression. — Machines à gaz pour les voitures. — Machines stationnaires qui font mouvoir des chaînes sans fin; comparaison avec les machines locomotives. — Puissance des machines à basse pression.

Il est de la plus grande importance, pour ce qui tient à l'économie des routes en fer, de considérer la nature et l'effet des différentes espèces d'agens qu'on peut y employer. Nous allons nous occuper d'abord de celui de ces agens qui est en même temps le plus simple dans son application et le plus sûr dans son effet. Conservera-t-il encore

long-temps cette prééminence ? C'est ce dont il est permis de douter ; mais jusqu'ici il n'existe pas de moteur plus propre à produire le mouvement sur un chemin en fer.

Force du cheval.

Lorsqu'on emploie la force d'un cheval pour mettre en mouvement une voiture sur un chemin en fer, il est évident qu'on doit chercher à obtenir la plus grande quantité possible d'effet utile dans le moins de temps possible, sans inconvénient pour l'animal. Nous avons donc deux choses à examiner : la durée d'une journée de travail et le maximum d'effet utile.

Durée de la journée de travail d'un cheval.

Le temps assigné communément à la durée journalière du travail d'un cheval est de huit heures ; mais il est prouvé par l'expérience qu'il y a de l'avantage à abréger ce nombre d'heures, et nous avons observé qu'un cheval s'use moins vite quand il fait le même travail en six heures de temps. Si la même quantité de travail se faisait en moins de six heures, l'excès de fatigue se manifesterait par la raideur des jarrets ; les effets

de la fatigue d'une action trop long-temps prolongée se feraient également remarquer si la durée du travail journalier était portée beaucoup au-delà de huit heures.

Les chevaux ont souvent aussi à souffrir de la maladresse de ceux qui les conduisent. Il est surtout très imprudent de les mener trop vite au commencement de leur journée; mais avec un bon conducteur ils peuvent très bien faire en six heures le travail entier d'un jour. Le cheval se portera mieux et aura plus de vigueur, et l'on économisera beaucoup de temps. L'usage barbare de faire travailler les chevaux jusqu'à ce qu'ils soient rendus de fatigue, ne s'introduira jamais sans doute sur les chemins en fer. Nous avons pris beaucoup de peine pour trouver la dernière limite à laquelle on puisse porter la force moyenne d'un cheval, et nous avons entièrement refondu les principes d'après lesquels ce sujet important doit être traité.

Il est de toute évidence que le travail d'un jour ne peut pas être fait dans une heure; mais quand on a besoin qu'une expédition de marchandise se fasse avec promptitude, il est utile de pouvoir déterminer la proportion du travail qu'on obtiendra si l'on veut qu'il soit fait en moins de temps; et pour être en état de le faire, il faut

établir les calculs sur la plus grande vitesse avec laquelle pourrait aller un cheval non chargé, en continuant à marcher pendant plusieurs jours de suite, parce que la moitié de cette vitesse est celle qui répond au maximum d'effet utile, ainsi que nous le prouverons dans le cours de cette recherche.

De la nature des forces (*) on déduit la formule suivante pour exprimer la vitesse correspondant à une durée quelconque de travail :

$\frac{14,7}{\sqrt{d}} = v =$ la plus grande vitesse possible exprimée en milles par heure, quand le cheval n'a pas de charge, et que la durée des heures du travail journalier est représentée par d.

J'ai rassemblé pendant quelques années beaucoup d'observations qu'on a faites à ce sujet, et leurs résultats s'accordent très bien avec celles que j'ai faites moi-même.

Le petit tableau suivant représente la durée

(*) Soit m la force musculaire qui peut être continuée pendant un jour, w le poids de l'animal, et s l'espace parcouru dans un temps donné; alors $v = \sqrt{\frac{64ms}{w}}$. Mais l'espace parcouru dans un temps donné est en raison in-

du travail et la plus grande vitesse d'un cheval non chargé.

Durée de la marche.	Plus grande vitesse du cheval non chargé, en milles par heure.	Plus grande vitesse du cheval non chargé, en kilomèt. par heure.
Heures.		
1	14,7	23,6
2	10,4	16,7
3	8,5	13,4
4	7,3	11,7
5	6,6	10,6
6	6	9,6
7	5,5	8,8
8	5,2	8,3
10	4,6	7,4

Ce tableau représente avec assez d'exactitude

---

verse de la durée du travail d'un jour, ou $s : \frac{1}{d}$ Donc $v = \sqrt{\frac{64m}{wd}}$, et quand la vitesse est de 6 milles par heure, quand $d = 6$ heures, on a $v = \frac{14,7}{\sqrt{d}}$.

Cette recherche est bornée aux cas où l'action est semblable; mais elle peut être poussée plus loin, et l'on peut analyser quelques points relatifs à la force et à la vitesse d'animaux, qu'on ne croit pas communément pouvoir être soumis aux calculs mathématiques.

la loi suivant laquelle diminue la vitesse quand le temps de la durée du travail augmente, et que le cheval marche sans être chargé sur une route de niveau. La force musculaire en action peut être considérée comme étant équivalente au quart du poids du cheval.

Quand la route est en pente, la vitesse, en montant, doit diminuer dans le rapport du sinus de l'inclinaison; et en descendant, elle doit augmenter dans la même proportion.

Ces données obtenues, nous allons continuer nos recherches, en examinant d'abord quelle est la vitesse correspondante au maximum d'effet utile.

Maximum d'effet utile.

Il est très important de connaître la vitesse qui répond au maximum d'effet utile, par la raison que la quantité de force que consomme le cheval en dépend en très grande partie.

Quand un cheval fait une route sans être chargé, la distance la plus grande qu'il puisse parcourir, de manière à être en état de recommencer et de continuer pendant plusieurs jours de suite, sans éprouver une fatigue dangereuse, est évidemment la limite de la vitesse qu'il peut prendre; mais dans

ce cas, l'effet utile qu'il produit est nul; et il est également évident que lorsqu'un cheval consomme toute sa force à traîner une voiture vide, son travail utile est encore nul. D'un autre côté, la charge peut être assez considérable pour que le cheval ne puisse qu'à peine la mettre en mouvement, et dans ce cas aussi, l'effet utile est nul. Mais entre ces limites de vitesse et de force, il y a un terme moyen qui donne le maximum d'effet utile, et qui par conséquent doit être le plus avantageux pour l'application de la force du cheval au service des chemins en fer.

La vitesse qui répond au maximum d'effet utile, est la moitié de la plus grande vitesse du cheval qui n'est pas chargé (*). La plus grande vitesse d'un

---

(*) Nommons V la plus grande vitesse d'un cheval non chargé, et m la force musculaire constante qui engendre cette vitesse; w la résistance surmontée quand le cheval n'est pas chargé, et v une autre vitesse quelconque; alors nous aurons $mv - wv =$ la force effective. Mais.... $mv = Vw$, ou $\frac{mv}{V} = w$. Donc, $mv - \frac{mv^2}{V} =$ la force effective, et cette force doit avoir un maximum.

Le maximum a lieu lorsque la différentielle de la variable est égale à o, ou quand $v - \frac{2vv}{V} = 0$, c'est-à-dire quand $V = 2v$. Donc la vitesse qui répond au maximum

bon cheval qui ne porte pas de charge ne surpasse pas 6 milles (9,6 kilom.) par heure, quand la marche est continuée pendant six heures, et par conséquent, 3 milles (4,8 kilom.) par heure sont la vitesse correspondante au maximum d'effet quand le travail est continué pendant six heures.

Si la journée de travail était fixée à huit heures, la vitesse extrême serait réduite à 5 milles (8 kilom.) par heure, ce qui donne $2\frac{1}{2}$ milles (4,5 kilom.) par heure pour la vitesse répondant au maximum d'effet utile.

Le taux moyen des chevaux plus faibles n'est pas aussi élevé, mais la différence doit plutôt porter sur la charge que sur le temps du travail.

---

d'effet utile est la moitié de la plus grande vitesse du cheval non chargé.

Soit Pv la force du cheval, alors

$$mv - \frac{mv^2}{V} = mv\left(\frac{V-v}{V}\right) = Pv,$$

et $$m\left(\frac{V-v}{V}\right) = P.$$

Quand $v = 0$, $P = m$; ainsi m est toujours égal à la force qui fait équilibre à la force du cheval en repos, et quand $v = V$, $P = 0$, comme cela doit être.

Au maximum $\frac{1}{2} m = P$; et comme m est constant, la force au maximum sera une quantité constante, quel que soit le nombre d'heures fixé pour la journée de travail. Pour un cheval de force moyenne $m = 113$ kilog.

Des expériences très nombreuses, et faites pendant très long-temps, ont prouvé que la force moyenne du cheval est de 113 kilogrammes, dont la moitié, $56\frac{1}{2}$ kilogrammes, peut être prise comme la force d'un cheval marchant pendant six heures par jour, et faisant 3 milles (4,8 kilom.) à l'heure.

Si la journée de travail était de huit heures, la force du cheval serait la même, mais il ne ferait que $2\frac{1}{2}$ milles par heure, pendant huit heures. La différence ne serait jamais que dans la vitesse, quelle que fût celle qu'on mettrait dans la durée de la journée de travail (*).

(*) La mesure de la force d'un cheval, adoptée par MM. Boulton et Watt dans le calcul de la force de leurs machines, est celle-ci : un cheval allant avec une vitesse de $2\frac{1}{2}$ milles par heure, élève un poids de 150 livres (68 kilogrammes) suspendu à une corde passée dans une poulie, la journée de travail étant de huit heures. (*Robison's Mech. Phil.*, vol. II, page 145.) $8 \times 2\frac{1}{2} \times 150 = 3000$ liv. (1360 kilog.) élevées à 1 mille (1609 mètres) pour la journée de travail. M. Palmer, dans la description du chemin en fer de son invention, emploie la même mesure de la force d'un cheval. Cela est fort bien établi comme expression élémentaire de la force d'un cheval pour évaluer l'effet des machines, mais la quantité est beaucoup trop forte pour l'effet positif d'un cheval de moyenne force. Nous avons rapporté quel est le plus grand

La meilleure manière de diviser le travail pour des voitures très lourdes, serait de partager la route en relais de 9 milles (14,5 kil.), quand la journée est de six heures de travail; de faire marcher les chevaux pendant trois heures; de les faire reposer ensuite pendant six heures, et de terminer la journée en leur faisant parcourir également en trois heures le dernier relais. Lorsqu'on veut transporter la plus grande quantité possible d'objets, en employant la plus petite quantité

---

effort sur les barres d'un chemin en fer qu'on puisse raisonnablement permettre dans la pratique. Pour un travail de huit heures, on a $8 \times 2\frac{1}{2} \times 125 = 2050$ livres (1137 hilogrammes) élevées à 1 mille Nous devons à M. Bevan quelques observations sur la force de traction nécessaire pour conduire les bateaux sur le grand canal de jonction (*voy.* chap. VIII). Il a trouvé la force de traction de 80 livres (36 kilog.), et l'espace parcouru de 26 milles par jour; ce qui est équivalent à $26 \times 80 = 2080$ livres (926 kil.) élevées à 1 mille pour la journée de travail, pour une vitesse de 2,45 milles (près de 4 kil.) par heure. Ce résultat est beaucoup moins fort que celui que donnerait notre formule pour le même cas, et qui serait 2900 livres (1318 kilogrammes) élevées à 1 mille. Mais la vitesse se rapproche infiniment de celle calculée par notre règle. Observez que la ligne de traction sur les canaux étant oblique avec la direction que suit le cheval, donne quelque différence dans la force.

possible de force, le maximum de vitesse doit être de 3 milles par heure, et quel que soit le degré supérieur de vitesse qu'on obtienne, ce ne peut être que par un surcroît de dépense. Il ne peut qu'être utile de faire voir quelle augmentation de dépense doit résulter quand la vitesse s'écarte du maximum d'effet utile, et quand on réduit la durée de la journée de travail.

Supposons, premièrement, que le temps du travail soit le même, c'est-à-dire de six heures par jour; le maximum d'effet utile est alors de 125 livres (près de 57 kilogr.), avec une vitesse de 3 milles (4,8 kil.) par heure; supposons que la dépense pour la voiture soit = 1 (*).

(*) Nous avons fait voir dans l'avant-dernière note que $\frac{250v}{V}(V-v)$ = la force d'un cheval, en livres avoir du poids, et en supposant que la force au maximum d'effet utile soit égale à l'unité, nous avons $\frac{2v}{V}(V-v)$ = la force; et comme la dépense est en raison inverse de la force, les frais du transport de marchandises à 3 milles de distance, quelle que soit la vitesse v, seront dans le rapport de $\frac{1}{3}$ à $\frac{V}{2v(V-v)}$, ou comme 1 : $\frac{3V}{2v(V-v)}$ $= \frac{9}{v(6-v)}$, dans le cas où $V = 6$.

Milles par heure.	Kilomètres par heure.	Dépense.	Force motrice.
			Kilogr.
2	3,2	1,125	71
3	4,8	1	56,8
3 ½	5,6	1,0285	47,3
4	6,4	1,125	35,5
4 ½	8,2	1,333	28,4
5	3,0	1,800	18,9
5 ⅛	8,2	2	16,5

C'est-à-dire que la dépense pour transporter des marchandises à trois milles par heure étant 1, celle pour les transporter à 4½ milles par heure sera 1 ⅓; et ainsi de suite, la dépense étant doublée quand la vitesse est de 5 ⅛ milles par heure (*).

Si $v = 2$ milles par heure, alors $\frac{9}{2(6-2)} = 1 \frac{1}{8}$.

Si $v = 4$ milles par heure, alors $\frac{9}{4(6-4)} = 8\frac{1}{8}$, tandis que la vitesse n'étant que de 3 milles par heure, la dépense est égale à 1.

(*) Dans une suite d'essais sur les chemins en fer, publiés d'abord par la feuille périodique le *Scotsman*, et rassemblés depuis en une seule brochure, on s'est servi de la formule du professeur Leslie pour estimer la force de traction. Cette formule paraît faite pour s'adapter à cer-

Si l'on réduit le nombre des heures de travail, en prenant les vitesses qui répondent au maximum d'effet utile, la dépense sera en raison inverse du produit de la vitesse par la durée du travail; en supposant que la dépense pour 6 heures, à raison de 3 milles par heure, est égale à 1.

Durée du travail.	Milles anglais par heure.	Dépense proportionn.	Durée du travail.	Milles anglais par heure.	Dépense proportionn.
1 heur.	7 $\frac{3}{8}$	2,45	1 heur.	11	3,2 5
2	5,2	1,73	2	7,8	2,3
3	4 $\frac{1}{4}$	1,41	3	6,4	1,87
4	3 $\frac{5}{8}$	1,23	4	5,5	1,63
5	3 $\frac{1}{4}$	1,1	5	4,9	1,46
6	3	1	6	4 $\frac{1}{2}$	1,333
7	2 $\frac{3}{4}$	0,94	7	4 $\frac{1}{8}$	1,25
8	2 $\frac{1}{2}$	0,9	8	3 $\frac{3}{4}$	1,2
10	2 $\frac{1}{3}$	0,74	10	3 $\frac{1}{2}$	0,985

Dans cette table, la première colonne donne la durée du travail en 24 heures; la seconde, les milles parcourus par heure, lorsque le travail fait dans le temps correspondant est le plus grand possible; la troisième fait connaître la dépense

taines observations qui ne sont pas détaillées. Elle n'est pas fondée sur les vrais principes. (*Voy.* pag. 252 des *Élémens de Physique* de Leslie, en anglais.)

pour la voiture quand celle d'un cheval ordinaire marchant six heures par jour, et faisant 3 milles à l'heure, est désignée par l'unité. Le chemin est ici supposé parfaitement de niveau, et la pression sur les barres de 125 livres avoir du poids (56,8 kil.) par pouce carré anglais (645 millim. carrés); la cinquième colonne donne la vitesse lorsque la pression n'est que la moitié de la précédente ou de 28,4 kil. sur 645 millimètres carrés; enfin, la sixième donne la dépense proportionnelle.

Nous donnons ces quantités comme étant la valeur entière de la force moyenne d'un cheval pour tous les cas compris dans la table. Sur les canaux on trouve de l'avantage à aller avec une vitesse à peu près égale au maximum d'effet utile pour une journée de travail de dix heures, en continuant à marcher pendant tout ce temps, sans presque aucun moment de relâche, à l'exception du temps que prend le passage des écluses. Lorsqu'on veut aller plus vite, l'augmentation de résistance devient très considérable, cette augmentation dans les fluides étant presque proportionnelle au carré de la vitesse. Sur les chemins en fer, au contraire, la résistance est presque constamment la même, quelle que soit la vitesse; la promptitude des transports sera donc un de leurs principaux avantages. On voit, par la table, qu'aussitôt que la

vitesse surpasse $4\frac{1}{2}$ milles par heure, il y a un avantage décidé à réduire la durée de la journée de travail, plutôt que de réduire la quantité du tirage. L'expérience, ou plutôt une combinaison de circonstances, a conduit les entrepreneurs de voitures au même résultat. Mais ils ont été plus loin, et ils ont trouvé plus de profit à doubler la quantité de travail assignée par nous comme devant être la tâche journalière d'un cheval, en mettant le cheval hors de service en 3 ou 4 ans. La différence entre l'intérêt qui couvre le surplus de capital employé à l'acquisition de nouveaux chevaux, et l'argent qu'il en coûterait annuellement pour en entretenir un plus grand nombre, est trop grande pour que le propriétaire de 3 ou 400 chevaux de voiture hésite un moment à en sacrifier le tiers chaque année. Il est triste de penser qu'il se trouve en tout temps dans ce pays plusieurs milliers de ces utiles animaux qui succombent sous l'excès du travail; puisse l'établissement des routes en fer apporter une sorte de remède à ce mal, et adoucir les souffrances que nous faisons endurer aux animaux.

Il ne paraît pas vraisemblable qu'on parvienne à faire servir le vent comme puissance motrice, sur un chemin en fer; nous allons donc passer immédiatement à l'examen des avantages de la

vapeur employée comme moteur. Il y a deux manières de la faire servir à cet objet : la première, au moyen d'une machine fixe ou stationnaire ; la seconde, en employant une machine locomotive qui avance en même temps que les chariots qu'elle fait rouler. Nous les examinerons toutes les deux, et nous comparerons leurs avantages.

Machines locomotives.

Une machine locomotive est une machine à vapeur placée sur des roues, de manière à ce que la force de la vapeur puisse mettre ces roues en mouvement, et, au moyen de l'impulsion qu'elle leur communique, leur faire tirer un train de chariots. Quelquefois une partie des roues de la voiture qui porte la machine est garnie de dents ou de crans qui s'engrènent dans des crans placés sur les barres formant le chemin de fer ; mais d'autres fois les roues et le chemin sont unis, et le frottement des roues sur les barres est la seule résistance qu'ait à combattre la force de la vapeur pour faire avancer le train de chariots. Parfois, les roues de la machine glissent au lieu de tourner, ce qui les use et les détruit très promptement ; c'est ce qui nous a engagé à rechercher le degré d'inclinaison et la quantité de pression qu'il con-

venait de donner aux chemins en fer, soit unis, soit à crans, pour prévenir l'inconvénient de glisser. (*Voy.* chap. III.)

Machine à haute pression.

Les machines à vapeur à haute pression paraissent être les seules qu'on ait employées jusqu'ici sur les chemins en fer, à raison de leur poids peu considérable, et de la simplicité de leur travail. Elles agissent à une pression qui varie de 210 à 280 grammes par centimètre carré au-dessus de la pression de l'atmosphère; et comme nous trouvons des inconvéniens à l'emploi des machines de cette espèce sur les chemins en fer destinés à un service général, nous croyons devoir faire connaître dès à présent, et en peu de mots, sur quoi se fondent nos objections. Premièrement, les règles d'après lesquelles se calcule la force des chaudières ne sont nullement exactes, et tendent à faire croire à celui qui en fait le calcul, que ces chaudières pourront soutenir une pression beaucoup plus forte que celle qu'elles soutiendraient en effet. La manière ordinaire d'éprouver les chaudières par la pression hydrostatique ne peut aider à rectifier ce défaut; car une chaudière ne se trouve pas éprouvée par cette méthode, dans des circon-

stances semblables à celles qui se rencontreront dans l'usage auquel elle est destinée. De plus, quand la pression à laquelle on la soumet pour l'éprouver surpasse un certain rapport bien connu avec la force absolue de la matière, il résulte de l'épreuve même un dommage irréparable pour la chaudière.

La vapeur à haute pression ne peut se produire que par un degré très élevé de chaleur, et l'action de cette chaleur sur la chaudière est très inégale, ce qui occasione une dilatation irrégulière, et par conséquent un effort qu'on ne saurait bien connaître. Le danger résultant de cet effort peut être beaucoup diminué, en employant un métal ductile pour construire la chaudière; mais sa nature et son intensité restent les mêmes ou à peu près les mêmes. Le feu lui-même altère continuellement la force de la chaudière, en brûlant et détruisant sa substance; et comme il faut une plus grande intensité de chaleur pour produire la vapeur dans une chaudière épaisse que dans une mince, une forte chaudière veut être très souvent visitée.

Peut-être pourrait-on obvier à ces divers inconvéniens, s'il était permis de compter sur la prudence humaine dans l'emploi de ces machines. Sur un chemin en fer où il y aura de la con-

currence, on doit s'attendre à des risques proportionnés; car dans ce cas les hommes ne craignent pas de s'exposer aux plus grands dangers, et quand les dangers personnels n'ont aucune influence, les plus sages précautions peuvent avoir été prises, les moyens les plus ingénieux employés pour garantir contre toute augmentation dangereuse dans la pression, et être rendus inutiles par l'imagination fertile de l'homme qui aura l'ambition d'aller plus vite que tous les autres sur le même chemin.

Nous avons fait connaître nos objections; nous allons maintenant examiner la vitesse qu'on obtient par les machines à haute pression, leur puissance, et les moyens par lesquels on pourrait les perfectionner.

La vitesse n'a dans ce cas d'autres limites que celle de la dépense et du risque des accidens; mais il y a pour les machines à vapeur, comme pour les chevaux, une vitesse qui donne un maximum d'effet utile, et après avoir fait voir quelle est la puissance de la machine, nous mettrons sous les yeux du lecteur ce nouveau résultat de la science.

Si l'on veut augmenter la vitesse sans s'écarter de la simplicité des mouvemens de la machine, le rayon des roues doit être fait plus grand. Mais il

n'est pas bon, par des raisons que nous ferons connaître plus tard, que la vitesse du piston à vapeur soit de plus de 52 mètres par minute, quand la longueur de la manivelle est de 304 millimètres, et alors le piston décrirait 1,232 mètres à chaque révolution de la roue, ce qui revient à $42\frac{1}{2}$ coups de piston par minute. La vitesse du chariot est à celle du piston comme la circonférence de la roue est à deux fois le diamètre de la manivelle. Il est donc facile de la calculer. 52 mètres par minute font 3120 mètres par heure; et, si l'on nomme c le rayon ou la longueur de la manivelle, et R le rayon de la roue, on a cette proportion.

$$4c : 6,2832\,\text{R} :: 3120 : \frac{4900\,\text{R}}{c}.$$

Ainsi $\frac{4900\,\text{R}}{c}$ = la vitesse du chariot en mètres par heure. Et, si le rayon de la manivelle est de 304 millimètres, et le rayon de la roue de 472 millimètres, on aura $\frac{4900 \times 0,472}{0,304} = 7936$ mètres par heure. En donnant plus de diamètre aux roues, on augmentera la vitesse et on la portera à un degré indéfini, autant du moins que cela pourra se faire dans la pratique.

Quand on emploie des machines à haute pression, on éprouve une perte considérable en com-

bustible, et qui n'est pas inférieure à la quantité nécessaire pour convertir en vapeur toute l'eau qui servirait pour une machine à basse pression. Cette perte serait sans importance dans une mine de houille, mais quand le charbon est cher, la moindre perte d'effet devient très désavantageuse pour l'entretien de la puissance de la vapeur.

Ayant eu très souvent l'occasion de nous occuper de la nature et de la force de la vapeur, et la comparaison faite avec le plus grand soin de notre théorie avec la pratique, nous ayant prouvé que la première embrasse les principaux points en question sur la force de la vapeur, nous placerons ici notre formule, nous réservant d'en donner la démonstration dans quelque autre circonstance (*).

Si l'on nomme f la force de la vapeur en pouces (anglais) de mercure, et t la température corres-

(*) On a cru ne rien devoir changer à l'exposé d'une formule dont l'auteur ne donne pas la démonstration, mais on fera observer ici à ceux qui pourraient ne pas le savoir, que le pied anglais est égal à 0,304799 mètre, et que le pouce vaut par conséquent 0,025399 mètre; que par conséquent 1 pied cube équivaut à 28,31 décimètres cubes, et que 1 pouce carré est égal à 645 millimètres carrés, à quelque chose près. La pression atmosphérique

pondante ; f' la résistance causée par le frottement du piston à vapeur, et par la vapeur non condensée dans le cylindre, ou par la pression atmosphérique dans les machines à haute pression, et n le volume du cylindre à vapeur, quand le volume de la vapeur admise avec la force f est l'unité. Alors on a pour la force de la vapeur produite par un pied cube d'eau (28,31 litres), l'expression

$$4873\,(459 + t \times 1 - \frac{nf'}{f} + \log \text{hyp.}\, n),$$

quand la vapeur n'agit pas par expansion.

Lorsqu'on emploie la force expansive de la vapeur, alors l'équation a un maximum qui doit avoir lieu quand log hyp. $n - \frac{nf'}{f}$ est un minimum ; et il est facile de prouver que cela arrive quand $n = \frac{f}{f'}$. Alors si l'on substitue $\frac{f}{f'}$ à n, on a

$$4873\,(459 + t) \times \log \text{hyp.}\, \frac{f}{f'}$$

= le maximum de puissance d'un pied cube d'eau convertie en vapeur.

---

supposée à Londres de 30 pouces de mercure, répond donc à 76,199, ou à un peu plus de 76 centimètres de mercure. (*Note du Traducteur.*)

Quand $f = f'$ le logarithme hyperbolique $\frac{f}{f'} = 0$ et la force est nulle; et quand $1 - \frac{f'}{f}$ est plus grand que le logarithme hyperbolique de $\frac{f}{f'}$, c'est un désavantage de se servir de la force expansive de la vapeur.

Si l'on veut calculer la quantité de combustible, nommant c la quantité qui convertit un pied cube d'eau capable de faire équilibre à la pression de l'atmosphère, et s la chaleur spécifique de la vapeur, a la chaleur spécifique de l'air et de la fumée qui s'échappe par la cheminée, et w le combustible nécessaire pour élever d'un degré la température d'un pied cube d'eau. Alors

$$c + \overline{(t - 212^\circ)} \times \overline{(a + s)}\, w$$

= la plus petite quantité de combustible nécessaire pour produire de la vapeur de la force f et d'une température t.

Admettons comme donné (*) que $c = 8{,}4$ livres de houille de Newcastle, $w = 0{,}0075$ liv.

(*) *Voyez* Tredgold, sur les *Principes de l'art de chauffer les édifices*, tab. I et II.

$s = 0,847$, et $a = 0,753$. Nous avons

$$8,4 + 0,012\,(t - 212)$$

= les livres de charbon nécessaires pour produire de la vapeur de la température t.

Nous allons maintenant appliquer ces formules pour déterminer la force d'une machine à haute pression et ce qu'elle dépense. Nous pouvons prendre comme pression de l'atmosphère 30 pouces anglais (0,76 mèt.) de mercure (*).

Pour déterminer le frottement du piston à vapeur et de sa tige, nous pouvons supposer sans erreur sensible que la totalité de la surface qui frotte est égale à l'aire du cylindre. Et nous savons que ces surfaces ne sauraient être exactement jointes sans laisser d'issue à la vapeur, si elles sont pressées l'une contre l'autre avec moins de force que la pression de la vapeur; mais comme nous ne connaissons pas avec précision quel excès de pression est nécessaire, nous supposerons que les

(*) Des observations continuées pendant 20 ans, faites à la Société royale, et relevées par M. Howard, donnent pour pression moyenne, à Londres, 29,8655 pouces; et le terme moyen des observations de trois ans, faites par M. Daniell, est de 29,881 pouces. (*Voyez* Daniell's *Meteorogical Essays*, pag. 266.)

surfaces en contact sont pressées avec une force double de celle de la vapeur. Mais le frottement est à peu près proportionnel à la pression, et dans ce cas-ci, il est à peu près le dixième de cette pression. Nous aurons $\frac{2f}{10} = \frac{1}{5}f =$ le frottement; c'est-à-dire que le frottement du piston à vapeur est la cinquième partie de la pression de la vapeur. On peut ajouter à cette quantité $\frac{1}{20}f$ pour excès de pression dans la chaudière, ce qui donne pour toute la perte $\frac{1}{4}f$.

Mais, dans les machines à haute pression, la pression qui s'exerce sur un des côtés du piston est la même que la pression atmosphérique; on a donc $f' = \frac{1}{4}f + 30 =$ la résistance à la force motrice f.

On a donc, dans le cas où une machine à haute pression agit par la force expansive de la vapeur,

$$4873\,(459 + t) \times \log \text{hyp.} \frac{f}{\frac{1}{4}f + 30}$$

$=$ la force mécanique d'un pied cube (28,31 litr.) d'eau convertie en vapeur.

Il est évident, par cette équation, qu'il n'y a aucun avantage à employer dans une machine à

haute pression la force expansive de la vapeur, quand la force de la vapeur est moindre que 60 pouces (152 centimètres) de mercure, car alors le logarithme hyperbolique est plus petit que $1 - \frac{\frac{1}{4}f + 30}{f}$.

Quand la machine agit sans employer la force expansive de la vapeur, on a

$$4873\,(459 \times t) + 1 - \frac{\frac{1}{4}f + 30}{f}$$

= la force mécanique d'un pied cube d'eau convertie en vapeur.

Exemple. La force de la vapeur étant supposée de 120 pouces de mercure (de 4 atmosphères), la température correspondante est, suivant M. Philippe Taylor, de 292,8 degrés du thermomètre de Fahrenheit (118°,9 Réaumur). Ainsi

$$4873(459 + 292{,}8) \times 1 - \frac{(\frac{1}{4} \times 120) + 30}{120}$$

= 1830000 livres élevées à 1 pied (831818 kilog. élevés à 304 millimètres).

La quantité de charbon est

$$8{,}4 + 0{,}012\ (292{,}8 - 212)$$

= 9,37 livres de houille (4,26 kilogrammes).

Mais la force d'un cheval est égale à 16000000 livres élevées à un pied (7272727 kilog. élevés à 304 millimètres) par journée de travail de huit heures (*).

Mais

$$1830000 : 9,37 :: 16000000 : 82.$$

Ainsi, en employant de la vapeur de la force de $44\frac{1}{2}$ livres par pouce carré de piston au-dessus de la pression atmosphérique (de la force de 31 grammes sur chaque millimètre carré de la surface du piston), on pourra faire un travail équivalent à la journée d'un cheval avec 82 liv. de houille (un peu plus de 37 kilog.).

Mais si le travail de la machine se faisait au moyen de la force expansive de la vapeur, dans ce cas

$$4873\,(459 + 292°,8) + \log \text{hyp. } 2$$

$= 2500000$ livres (1136000 kilogrammes) élevés à 1 pied (304 mill.) avec 9,37 livres (4,28 kilog.)

(*) $33000 \times 60 \times 8 = 15920000$ livres avoir du poids, représente la force d'un cheval telle qu'on la compte ordinairement pour les machines à vapeur; mais, suivant notre calcul, elle est moindre d'un quart. (*Voyez* la page 99 et la note.)



de houille; et par conséquent 59 liv. (moins de 27 kilog.) de houille suffiraient pour un travail équivalent à la journée d'un cheval.

La table Ire, à la fin de cet ouvrage, indique la puissance d'un décalitre d'eau convertie en vapeur de différens degrés de force, soit qu'elle soit employée par expansion de manière à produire le maximum d'effet, soit qu'on se serve de toute la vapeur du coup entier de piston. Elle fait aussi connaître la quantité de combustible consommée dans les deux cas. Au moyen de cette table, il sera facile de s'assurer de la quantité de charbon équivalente à la journée de travail d'un cheval.

Cependant ces résultats ne sont applicables qu'aux machines qui ne changent pas de place, et en les faisant servir pour une machine locomotive, il faut, si l'on veut les rendre directement comparables avec la force d'un cheval, en déduire la force employée pour mouvoir le poids de la machine même. Ainsi, en supposant qu'on ait trouvé par la méthode précédente la quantité de charbon qui répond à la journée de travail d'un cheval, cette quantité, multipliée par le poids du train de chariots conduits par la machine, et divisée par ce poids moins le poids de la machine et du chariot qui la porte, donnera le

poids du charbon qui, pour une machine locomotive, équivaut à la journée de travail d'un cheval.

Supposons qu'un train de chariots pèse 73 tonneaux métriques, que la machine qui le conduit pèse avec son appareil 8 tonneaux métriques, et qu'on ait trouvé qu'il faut 37 kilogrammes de charbon pour le travail d'une machine stationnaire équivalent à la journée d'un cheval, alors $\frac{73 \times 37}{73 - 8} = 41,55$ kilogrammes, pour la quantité de charbon nécessaire au même travail avec une machine locomotive.

Les partisans des machines à haute pression croiront peut-être que cette perte d'effet sera compensée par l'emploi qu'on fera du surcroît de vapeur pour chauffer l'eau de la chaudière; cela pourrait être, car, avec un appareil bien proportionné, on économiserait environ 5 kilogrammes de charbon sur 42 kilog. La meilleure méthode serait de faire passer la vapeur surabondante par des tuyaux ayant beaucoup de surface, jusqu'au réservoir qui sert pour entretenir la chaudière, et qui, dans tous les cas, devrait être placé sur le chariot de la machine à vapeur; et après avoir quitté les tuyaux en traversant le réservoir, la vapeur devrait passer dans de petits

tuyaux de métal ou des caisses formées de manière à présenter le plus de surface possible à l'air (*). La vapeur condensée dans ces tuyaux descendrait dans le réservoir, et la partie non condensée dans son passage par les tuyaux, irait sortir par la cheminée, où elle aiderait le tirage.

Mais nous croyons que tout ce qu'on pourra ménager de cette manière ne fera qu'équivaloir à la perte de chaleur qui se fait à la chaudière, lors même qu'elle est bien garantie et conduite avec le plus grand soin. Car il est difficile de régler la surface sur laquelle la chaleur doit agir, et le tirage doit être trop faible pour produire de la vapeur à haute pression. Sans doute si l'emploi de ces machines devient plus général, on finira par trouver qu'il y a de l'avantage à y adapter un soufflet, et qu'on se servira de ce moyen.

D'autres causes de perte d'effet peuvent augmenter de 30 pour cent les quantités que nous avons établies, et porter à 54 kilogrammes la

---

(*) La quantité de surface qui peut condenser une quantité donnée d'eau, peut se calculer aisément par les règles données dans l'ouvrage de Tredgold, sur les *Principes du chauffage et de la ventilation des édifices*, etc., dont la traduction se trouve chez Bachelier, libraire, quai des Augustins, n° 55, à Paris.

houille équivalente à la journée de travail d'un cheval, pour la machine locomotive la plus parfaite que l'on pourra vraisemblablement inventer.

Les machines qui servent sur les chemins en fer de Newcastle consomment, terme moyen, au moins deux fois 54 kilogrammes pour faire le même travail.

Maximum d'effet utile dans les machines à vapeur.

Nous avons maintenant à rechercher le maximum de puissance comme dépendant de la construction de la machine; car chaque machine en particulier doit avoir sa force correspondante au maximum d'effet. Si le piston dépassait une certaine vitesse, il est évident que la chaudière ne pourrait pas fournir la quantité de vapeur nécessaire. La même chose arriverait si les passages pour la vapeur étaient plus petits que ne le demanderait la force de la chaudière. Mais il est évident que la vapeur doit être capable de suivre le piston lorsqu'il joue avec sa plus grande vitesse, ce qui détermine un des points les plus importans pour établir sur des principes théoriques leurs proportions mutuelles. Nous al-

lons donc examiner les conditions qui limitent la vitesse du piston, savoir, son mouvement et l'étendue de chaque coup qu'il donne quand il n'y a d'autre résistance que le frottement même du piston, et que la vapeur est en pleine activité, et comme elle doit se trouver dans l'état ordinaire de travail de la machine. Le mouvement du piston peut, dans ces circonstances, être considéré comme un mouvement accéléré. Soit donc w le poids de la masse à laquelle le piston donne la vitesse 2V à la fin du coup; P la pression sur le piston en livres, et l la longueur du coup en pieds, alors on a $60 \times 8 \sqrt{\frac{lP}{w}} = 2V$, ou $240 \sqrt{\frac{lP}{w}} = V =$ la vitesse moyenne du piston par minute.

Mais si la machine est bien conduite, le poids de la masse w règlera la vitesse et la rendra uniforme au bout d'un certain temps; et pour que cela puisse être, il faut que $w = P$: par conséquent, $240 \sqrt{l} = V$. Mais nous avons démontré précédemment que la vitesse v correspondante au maximum d'effet utile doit être $= \frac{1}{2}$ V. Donc, $120 \sqrt{l} = v$, la vitesse en pieds par minute qui convient le mieux à une machine. Quand le piston d'une machine a 2 pieds de course, $v = 170$ pieds

par minute, et le nombre de coups de piston est égal à 170 pieds divisés par 4 ou par le double de la longueur de la course du piston, c'est-à-dire qu'il y a 42 ½ coups de piston par minute.

En portant la course du piston à 3,4 pieds, on obtient une vitesse de 220 pieds par minute avec 32 coups de piston par minute.

Si l'on varie le maximum de puissance, la diminution d'effet est la même que pour la force du cheval (*voyez* le tableau, pag. 102) : mais il y a cet avantage avec une machine, c'est qu'elle peut être construite pour toute sorte de vitesse; il ne faut qu'en proportionner convenablement les parties; celles du cheval ne peuvent pas se changer.

Les ouvertures pour le passage de la vapeur, la surface exposée au feu, la grandeur du foyer et l'aire de la cheminée doivent toutes être proportionnées de manière que la machine pût être capable de doubler son effet ordinaire.

Machines locomotives à basse pression.

Les raisons qui font regarder comme désavantageux l'emploi des machines à basse pression pour la conduite des chariots, sont tirées de la complication de l'appareil et du poids de l'eau

nécessaire pour la condensation. Le volume de la machine, l'étendue de la place qu'elle occupe, et l'immense quantité d'eau nécessaire à la condensation, rendent tout-à-fait improbable qu'on puisse jamais les employer avec quelque avantage. Il ne faudrait pas moins qu'un demi-tonneau d'eau par heure, pour la condensation seule de la vapeur équivalente à la force d'un cheval : il n'y a donc aucune probabilité que les machines à condensateur puissent devenir machines locomotives, et il est inutile que nous nous en occupions davantage.

Machines à gaz pour les voitures.

On a proposé, dans ces derniers temps, un nouveau moyen de mettre en mouvement les voitures, dont nous ne devons pas oublier de faire mention, car il a vivement excité l'attention publique.

La force de cette nouvelle machine s'obtient en brûlant du gaz dans un cylindre, de manière à raréfier considérablement l'air qui s'y trouve renfermé. Il est alors refroidi, et c'est la différence entre la pression de l'atmosphère et l'élasticité de l'air du cylindre qui constitue la force motrice. On a cherché à prouver que cette force résulte de ce

que les produits de la combustion se trouvent condensés dans un volume plus petit que celui qu'occupait d'abord le combustible ; mais cette explication n'est pas suffisante pour rendre raison de l'effet produit.

Le principe de l'action de cette machine peut aisément s'éclaircir par une expérience très simple. Faites brûler une feuille de papier qui s'enflamme très vite, sous un verre renversé, de manière à ce que la flamme en remplisse toute la capacité, et plongez immédiatement alors l'entrée du verre dans l'eau. Il en résultera que l'air chaud ou la flamme sera condensé par l'eau, et se retirera dans un espace égal à un tiers environ de la capacité du verre, tandis que l'eau s'élèvera et remplira le verre jusqu'à ce que l'air qu'il contient se trouve de la même élasticité que l'atmosphère.

M. Brown, à qui l'on doit l'invention de la machine à gaz, produit un effet semblable en brûlant du gaz dans un cylindre métallique ; et au moyen de la flamme du gaz, et d'un appareil très ingénieux, il tire de ce phénomène bien connu une force mécanique très considérable. Voyons si cette force pourra ou non devenir utile comme moteur de machines locomotives pour conduire des voitures.

Supposons, afin de constater le degré de raréfaction du vide dans le cylindre, que x représente la température de la flamme, la température première de l'air dans le cylindre étant de 50° du thermomètre de Fahrenheit (8° R.). Alors $\frac{450+x}{500}$ = le volume de l'air raréfié (*), et quand la pression de l'atmosphère est de 76 centimètres, on a

$$1 : \frac{500}{450+x} :: 76 : 76\left(\frac{500}{450+x}\right)$$

= la force de l'air resté dans le cylindre quand il est refroidi à 50° Fahr.; par conséquent

$$76\left(1-\frac{500}{450+x}\right)=\frac{76\,(x-50)}{450+x}$$

= la force sur le piston en centimètres de mercure, sans déduction pour le frottement ou pour toute autre cause de perte d'effet. Si la température de la flamme est de 1050° (452°,4 R.), et il

(*) Voyez *Principes de l'art de chauffer les édifices publics*, par Tredgold, art. 220. La traduction française se trouve chez Bachelier, libraire, quai des Augustins, n° 55, à Paris.

serait sans doute facile de la lui donner aussi élevée, $\frac{76(1050-50)}{450+1050}=50{,}66$ centimètres de mercure pour la force du piston, sans déduction du frottement, etc.

Cherchons maintenant quelle est la dépense en gaz nécessaire pour produire une quantité donnée de force mécanique.

Nommons b le nombre de décimètres cubes de gaz qui élèveraient d'un degré du thermomètre de Fahrenheit la température d'un décimètre cube d'air, alors $bx=$ le volume de gaz qui élèvera de x degrés la température d'un décimètre cube d'air, et $\frac{1000}{bx}=$ le volume d'air qui serait chauffé par 1000 décimètres cubes de gaz.

Donc $\frac{1000\times 76\,(x-50)}{bx\,(450+x)}$ $=$ la force mécanique de 1000 décimètres de gaz, sans déduction du frottement, etc.

Mais cette équation a un maximum, et si l'on fait x variable, et sa différentielle $=0$, on trouve $x=208°$. Ainsi on obtiendra la plus grande force mécanique, quand la température de l'air raréfié sera de 208° (78°,2 R.), et en faisant le calcul d'après ce maximum, on trouve un peu plus de

$\frac{87}{b}$ pour la force mécanique de 1000 décimètres de gaz, en centimètres de mercure, le frottement non déduit.

Le poids d'un centimètre de mercure d'un décimètre carré étant de 1,3598 kilogrammes, les kilogrammes élevés à un décimètre de haut, en supposant qu'il n'y eût pas de frottement, seraient $\frac{119,27}{b}$, par 1000 décimètres cubes de gaz.

Le maximum de température serait différent, si l'on faisait la réduction convenable pour le frottement; l'effet serait moindre; mais il suffit pour notre objet d'avoir une estimation approchée de la force.

Si l'on se servait de gaz oléfiant bien pur, on aurait, d'après les expériences de M. Dalton, rapportées dans la Chimie de Thomson, $\frac{1}{41040}$ pour la valeur de b, ce qui donne environ 4961000 kilogrammes élevés à un décimètre pour la force mécanique de 1000 décimètres cubes de gaz, le frottement non déduit, de sorte que 1000 décimètres cubes de gaz oléfiant n'équivalent pas à la cinquième partie de la force d'un cheval, pour le service d'une machine, lors même que la machine serait supposée tout-à-fait exempte de frottement : ce gaz serait donc trop dispendieux pour servir

au transport des marchandises sur les chemins en fer.

Si l'on employait du gaz produit par la houille, son effet serait plus faible que celui de l'hydrogène carboné pur; et pour cette espèce d'hydrogène $b = \frac{1}{22800}$, suivant Dalton; ce qui donnerait 2726400 kilogrammes élevés à un décimètre pour la force mécanique de 1000 décimètres cubes de gaz agissant dans une machine, sans déduction du frottement : et cette quantité ne répondant qu'à la huitième partie de l'effet utile d'un cheval, il est bien évident que la machine de M. Brown serait beaucoup trop dispendieuse dans toute circonstance où il serait possible de se servir de chevaux. Dans une machine de cette espèce, on ne peut allouer moins, pour pertes résultant du frottement et de la portion de chaleur qui se consume sans utilité, que le tiers de la force calculée, ce qui réduit la force de 1000 décimètres cubes de gaz extrait de l'huile à 3307000 kilogrammes élevés à 1 décimètre, et celle de 1000 décimètres de gaz tiré du charbon à environ 1807000 kilogrammes élevés de même. Ces machines sont plus compliquées que celles à vapeur à haute pression, et dans le cas où on les ferait servir comme machines locomotives, il faudrait

que le gaz y fût comprimé jusqu'à $\frac{1}{30}$ de son volume naturel, et par conséquent qu'il exposât aux dangers d'une explosion.

Avant de quitter le sujet relatif aux machines locomotives, nous ferons remarquer qu'elles auront toujours un grand inconvénient sur un chemin en fer destiné au service général où l'on voudra leur donner une très grande vitesse; car il est impossible, dans ce cas, que les passages pour traverser la route soient multipliés : de sorte qu'une seule voiture qui irait lentement pourrait, sur un de ces chemins, forcer toutes les autres à diminuer leur vitesse; et non-seulement il en résulterait cet inconvénient, mais il y aurait encore le danger de voitures qui s'accrocheraient. Un bateau à vapeur peut s'écarter sur l'eau comme il lui convient, une voiture de poste a toute la largeur de la route pour se diriger, mais une voiture à vapeur ne peut sortir de son ornière pour éviter un accident. Nous allons maintenant nous occuper des machines stationnaires, et examiner si elles doivent donner une espérance plus raisonnable de voir employer la puissance de la vapeur avec avantage et sûreté sur les chemins en fer.

Machines fixes ou stationnaires.

Concevons une route divisée dans toute sa longueur en relais fort courts, et qu'à chacun de ces relais on a placé une machine à vapeur qui doit agir sur une chaîne sans fin, embrassant toute l'étendue d'un ou de plusieurs relais, et tournant sur des rouleaux ou sur des poulies ; concevons encore qu'en remuant simplement un bras de levier garni d'un appareil à frottement, on puisse lier une voiture à la chaîne, et lui faire prendre en peu de secondes la vitesse de la chaîne, ou bien l'en détacher en un instant, si cela est nécessaire. Les conséquences de cet arrangement seraient que tous les chariots ainsi attachés à la même chaîne avanceraient avec la même vitesse, et que par conséquent, ils ne seraient pas exposés à s'entrechoquer. On pourrait faire avancer à la fois un nombre de chariots proportionné à la force de la machine, car le directeur de la machine pourrait la régler sur le nombre des chariots, de manière à conserver toujours la même vitesse ou à peu près la même. Les machines pourraient être plus parfaites, mieux conservées, et confiées à des hommes plus sûrs qu'on ne peut le faire pour quelque espèce de machine locomotive que ce soit.

Calculons maintenant l'étendue à laquelle pourrait être transmis le mouvement à l'aide d'une chaîne sans fin portée sur des rouleaux. Le plus grand effort qu'on dût faire supporter à une chaîne est égal au poids d'un demi-mille (800 mètres) d'étendue de cette chaîne; par conséquent le poids de la quantité de chaîne nécessaire pour le service d'un mille sera égal à deux fois la force motrice de la machine (*). Mais si les rouleaux sont bien faits, et qu'il y ait un rapport convenable entre le diamètre du rouleau et son axe, le frottement ne sera guère que de $\frac{1}{100}$ du poids de la chaîne; par conséquent $\frac{2}{100}$ ou $\frac{1}{50}$ de la force motrice sera perdu en faisant mouvoir la chaîne, lorsque les machines seront éloignées d'un mille. Il y aurait perte de $\frac{1}{25}$ de la force si les machines étaient éloignées de 2 milles, et la perte irait en augmentant, à mesure que la distance entre les machines deviendrait plus grande; de sorte que si elle était de 50 milles, toute la force se

(*) La machine doit tirer la chaîne dans les deux directions, autrememt il faudrait que les stations fussent rapprochées de moitié, car la chaîne doit être double.

consumerait à faire mouvoir la chaîne; car, quelque grande que fût la puissance qu'on pourrait employer, elle n'aurait alors d'autre effet que de faire sur la chaîne un effort supérieur à celui que nous avons dit ne pas devoir être dépassé.

La plus grande distance que l'on dût adopter dans la pratique entre deux stations peut donc être fixée de 8 à 10 milles (de 12800 à 16000 mèt.), et à cette dernière distance, la perte de force serait d'un cinquième.

On conçoit qu'un système qui exige une machine de 10 en 10 milles de distance, ne peut convenir qu'à un chemin en fer établi pour un commerce très étendu; mais sur une ligne de passage où l'affluence des marchandises et des voyageurs serait assez grande pour permettre de faire les frais nécessaires à une semblable entreprise, il est hors de doute qu'elle réussirait : le même principe général de mouvement agirait dans toutes les parties, soit que le chemin fût de niveau, soit qu'il montât ou qu'il descendît. Il y aurait une chaîne pour faire aller les voitures légères avec toute la vitesse convenable, et un second chemin en fer à double ornière pour les voitures de roulage, qui seraient mises en mouvement par une autre chaîne dont l'action serait plus lente.

Les frais d'établissement pour les machines lo-

comotives et pour les machines stationnaires ne seraient guère plus grands dans un système que dans l'autre; mais les dépenses annuelles seraient beaucoup moins fortes avec des machines stationnaires. La plus grande difficulté serait l'interruption de la ligne par d'autres routes qui la traverseraient: on y remédierait en partie en choisissant une direction convenable, et en établissant les stations dans les endroits où la route serait coupée par une autre.

Puissance des machines à basse pression.

Nous avons fait voir précédemment (pag. 112) que la force d'une machine à vapeur est

$$4873\ (459 + t) \times \log \text{hyp.} \frac{f'}{f}$$

au maximum, et quand elle agit par expansion de la vapeur; et qu'elle est

$$4873\ (459 + t) \times \left(1 - \frac{f'}{f}\right),$$

quand elle agit à pression entière.

Maintenant si nous voulons déterminer la valeur de f', nous devons tenir compte de la vapeur qui ne se condense pas et du frottement de la

pompe à air. Quand le frottement de la pompe à air est réduit à l'effet au piston à vapeur, il ne peut être évalué à plus d'un pouce (25 millimètres) de mercure. Supposons que la force de la vapeur non condensée soit de 3 pouces (76 millimètres) de mercure, et que le frottement du piston à vapeur soit $= \frac{1}{4} f$, ainsi que nous l'avons déterminé précédemment, alors

$$f' = \tfrac{1}{4} f + 4 \text{ (*)}$$

et $4873\ (459 + t) \times \log \text{hyp.}\ \frac{f}{\frac{1}{4}f + 4} =$ le nombre de livres avoir du poids, élevées à un pied par la plus grande force d'un pied cube (28,316 litres) d'eau convertie en vapeur de la température t, et de la force f en pouces de mercure.

Exemple. Soit la force de la vapeur égale à 35 pouces (889 millimètres), ou de 2 $\frac{1}{2}$ livres (1,1 kilogramme) au-dessus de la pression de

(*) Le praticien demandera naturellement combien de livres sur 1 pouce carré ceci donne pour la pression effective sur le piston. Le nombre de pouces de mercure est $f - \left(\frac{1}{4} f + 4\right) = 22 \frac{1}{4}$, ou très près de 11 livres (5 kil.) sur 1 pouce (645 millim.) carré pour la pression entière.



l'atmosphère dans la chaudière. La température correspondante est de 220° Fahr. (83°,5 R);

et $4873\,(459 + 220)\ \text{log. hyp.}\left(\frac{35}{8{,}75 + 4}\right)$ = 3350000 livres avoir du poids, élevées à un pied anglais, par un pied cube d'eau converti en vapeur; ce qui équivaut à 163366 kilogrammes élevés à un décimètre de hauteur par un litre d'eau convertie en vapeur.

La table seconde à la fin de ce Traité a été calculée sur cette base; nous avons lieu d'espérer que le lecteur trouvera dans la réunion des tables de quoi se former une idée assez complète de la force que produit le combustible, et de la quantité qu'en consomment les machines à vapeur.

Le maximum de vitesse pour une machine à basse pression a le même rapport avec la longueur de la course du piston que pour une machine à haute pression. Nous n'avons pas cherché à déterminer les variations qui ont lieu dans l'une et l'autre machine quand elles agissent pas expansion, mais elles ne peuvent pas être très considérables.

CHAPITRE V.

Des voitures pour les chemins en fer. — Poids des voitures. — Chariots à huit roues. — Dimensions des roues et des essieux. — Règles pour la force des roues. — Résistance des voitures, comparée avec l'expérience. — Hauteur de la charge et distance entre les roues. — Manière d'atteler les chevaux aux voitures. — Différentes sortes d'essieux et de défenses contre les accidens.

Les chariots employés sur les routes en fer ordinaires sont construits très solidement, pour pouvoir résister aux cahots auxquels ils sont exposés à chaque changement de vitesse; et il est nécessaire d'employer, pour les parties qui se mettent en contact, des pièces solides qui s'étendent un peu au-delà du corps du chariot, et qui soient garnies de cercles de fer pour qu'elles ne puissent pas se fendre. Mais les voitures pour les voyageurs, et celles qui portent certaines espèces de marchandises, doivent être garnies de ressorts pour amortir la force des cahots.

Le poids des chariots varie considérablement sur les différens chemins en fer; quelquefois il va presqu'à la moitié du poids total, quelquefois il n'en est que le tiers; mais il est assez facile de voir que quand les roues n'ont pas plus de un mètre à 1,2 mètre de diamètre, la proportion peut être réduite à un quart, et se trouve assez forte. Dans ce cas la charge étant de 3 tonneaux, la voiture en pèserait un, ce qui ferait en tout 4 tonneaux.

On conçoit bien que de petits chariots sont plus lourds et plus dispendieux à proportion que de plus grands; mais comme l'effort qui s'exerce sur les roues dans un chemin en fer doit être limité, il n'est guère possible d'avoir des chariots plus grands sans augmenter le nombre des roues.

Chariots à huit roues.

Quand une voiture a plus de quatre roues, elle doit être soutenue de manière que la pression puisse être également divisée entre toutes les roues. Dans le cas où l'on emploie huit roues pour un seul corps de voiture, si le corps de la voiture s'appuie sur les deux assemblages dont chacun réunit deux paires de roues au milieu de sa longueur (*voy*. fig. 26), et s'il se lie avec ces

assemblages de manière à permettre le plus grand changement possible de niveau sur le chemin, il est évident que chacune des roues éprouvera une pression égale. Si l'on ôtait un des assemblages à quatre roues, et qu'on le remplaçât par un essieu avec deux roues, le chariot en aurait six, et il serait facile d'arranger la charge de manière à ce que la pression sur chaque paire de roues fût égale.

Par ce mode de construction on pourrait rendre les chariots capables de porter 6 ou 8 tonneaux, sans exiger une trop grande dépense en fer pour la construction du chemin. Une capacité moindre que 6 tonneaux de charge serait très incommode, par la raison que de petits chariots sont souvent remplis avec des objets très volumineux qui ne les chargent pas. La grandeur d'un chariot destiné aux transports du commerce général ne doit pas être inférieure à celle des chariots de roulage.

La charge qui pèse sur chaque roue doit être limitée et réglée sur la force des ornières en fer; on doit rarement mettre plus de 2 tonneaux par roue, et jamais moins d'un demi-tonneau. La grosseur des essieux doit en conséquence varier depuis 2,2 pouces jusqu'à 3,5 pouces (de 56 à 88 millimètres). La charge la plus avantageuse serait peut-être celle où chaque roue porterait un ton-

neau et $\frac{1}{4}$ (près de 1300 kilogrammes), ce qui exigerait un essieu de 3 pouces (76 millimètres) de diamètre.

La grandeur des roues est ce que nous avons maintenant à examiner. Nous avons fait voir, dans le troisième chapitre, que, pour l'effet, les grandes roues étaient les plus avantageuses; mais dans la pratique, leur diamètre doit être limité entre 13 et 15 décimètres, quand elles sont faites en fer coulé, et même quand elles sont en bois, avec des bandes de fer forgé sur leur bord. On ne peut guère dépasser cette grandeur sans les rendre très pesantes; et la perte d'effet causée par le poids d'une roue devient très considérable aux montées, quoique ce poids y ajoute au contraire à la descente. Sur une route de niveau, la force nécessaire pour faire mouvoir une roue pesante n'est pas grande, et les dimensions que l'on donne à celle-ci ne paraissent avoir de limites que les proportions les plus convenables pour la force et la durée. Une roue de 15 décimètres de diamètre est celle dont la grandeur nous paraît la plus considérable que l'on puisse employer sans imprudence, et on doit la faire avec la fonte la plus dure; elle doit aussi être coulée avec beaucoup de précaution, afin de prévenir l'effet de la retraite sur elle-même au moment du refroidissement; car si une fort grande

roue venait à être brisée, par suite d'une tension inégale, à une voiture qui avancerait avec une vitesse considérable, les conséquences pourraient devenir très sérieuses. On diminuerait le danger d'un accident de cette espèce en adaptant aux voitures une sorte de pied, fait de manière que dans le cas où une roue viendrait à manquer, la voiture serait soutenue par ce pied qui glisserait sur la partie de l'ornière en fer répondant à la roue brisée; et la voiture ne tomberait que de quelques centimètres.

On ne doit pas s'attendre qu'on puisse faire des roues en bois assez saines pour porter un poids de deux tonneaux, à moins qu'elles n'aient à peu de chose près la même pesanteur que les roues en fer, et alors elles auraient sur celles-ci le désavantage d'être moins durables.

Il est facile de donner aux parties des roues en fer coulé les proportions nécessaires pour résister à une pression donnée, mais quand on le fait, il faut toujours les regarder comme sujettes à doubler la pression ordinaire sur la roue. La méthode la plus aisée est de considérer ces parties comme des prismes solides rectangulaires, et après en avoir déterminé le volume, de le disposer dans la forme de plus grande résistance. On trouvera la force de la circonférence des roues par la règle 2,

de l'art. 108, de l'Essai de Tredgold sur la force du fer coulé. La distance entre les rais, et la force des rais peuvent se déterminer par la règle donnée à l'article 236 du même ouvrage, et la distance de la direction de la force ne peut guère être plus grande que l'épaisseur des rais. La forme de section la plus avantageuse pour les rais se voit fig. 25; elle réunit la double condition de pouvoir se mouler facilement et d'avoir la plus petite quantité possible de matière réunie à l'axe neutre des rais. Un exemple de l'usage de ces règles rendra l'opération plus facile à ceux qui ne sont pas dans le cas de faire souvent de semblables calculs.

Une roue de 15 décimètres de diamètre doit avoir 12 rais. Supposons que la charge qu'elle aura à porter soit de 1 $\frac{1}{4}$ tonneau(*) lorsque la pression sera égale sur les deux roues, alors 2 $\frac{1}{2}$ tonneaux, ou 5600 livres avoir du poids (2545 kilogrammes), seront le plus grand poids qui puisse peser sur la roue. Chaque rais doit pouvoir résister à cette pression, et si on considère le rais comme

(*) Le tonneau anglais est de 20 quintaux de 112 livres avoir du poids, ou de 2240 livres avoir du poids, et équivaut à 1014 kilogrammes, c'est-à-dire qu'il est un peu plus fort que le tonneau métrique, qui n'est que de 1000 kil.

un prisme carré, et si la distance de la direction de la force est égale au côté du prisme, ce qui est à peu près l'extrême limite qu'elle puisse atteindre, alors la règle à laquelle nous venons de renvoyer se réduit simplement à ceci : divisez la pression en livres par 2200, et le quotient sera l'aire du rais, exprimée en pouces anglais. Et cette aire peut être disposée dans la forme la plus avantageuse pour la force, et comme une défense contre les défauts de la fonte, etc. Or, la charge est de 5600, ainsi nous avons $\frac{5600}{2200} = 2{,}55$ pouces pour l'aire; la racine carrée de ce nombre est 1,6 de pouce (40 millimètres), pour le côté de la section.

La circonférence de la roue sera de 15,5 pieds anglais (4,7 mètres) au diamètre moyen de la jante; ainsi la distance entre les rais à la jante sera de 1,4 pied environ (plus de 4 décimètres); et comme la longueur, multipliée par la pression en livres avoir du poids, et divisée par 850 fois la largeur du bord de la roue, est égale au carré de son épaisseur, si l'on suppose que la largeur est de 4 pouces (101 millim.), on a $\sqrt{\frac{1{,}4 \times 5600}{4 \times 850}} = 1{,}52$; ainsi le métal disposé dans la forme convenable pour former les jantes de la roue doit avoir 1,52 pouces, près de 39 millim. d'épaisseur.

Puisque le fer des jantes doit être en quantité égale à $4 \times 1,52 = 6,08$ pouces, et que la circonférence a 15,5 pieds, le poids des jantes sera de 300 livres (136 kil.), le poids des rais et du moyeu sera de 245 liv. (111 kil.), et le poids total de la roue de 545 livres (près de 248 kilogrammes).

Le poids d'une roue de 10 pieds de circonférence qui devrait porter la même charge serait de 291 livres (132 kil.), si elle avait 10 rais et que la largeur aux jantes fût de 4 pouces (101 mill.) comme ci-dessus.

Les roues pour les chemins à ornières plates peuvent être calculées de la même manière. Leur poids ne sera pas aussi fort, parce qu'il n'y a pas besoin d'autant de largeur à la circonférence que dans les roues à ornières étroites. Pour ces sortes de chemins, la largeur convenable aux roues est de deux pouces (50 millimètres) à peu près pour chaque tonneau de charge sur chaque roue.

Avec des roues de 5 pieds (152 centimètres) de diamètre sur les chemins à ornières étroites, le poids du chariot sera un peu plus fort que le quart du poids total, charge et chariot compris. Avec des roues de 4 pieds 6 pouces (137 centimètres), on peut le réduire à un quart.

Si le poids total est de 5 tonneaux, ou que le

chariot, pesant $1\frac{1}{4}$ tonneau, soit chargé de $3\frac{3}{4}$ tonneaux, que les essieux aient 3 pouces (76 millimètres) de diamètre, les roues 54 pouces (137 centimètres), et que le frottement soit égal à la huitième partie de la pression, on a $\frac{3}{54\times 8}=\frac{1}{144}$ partie du poids pour la force qui traînerait le chariot chargé sur un chemin de fer de niveau; c'est à peu près 78 livres avoir du poids, ou environ 35 kilogrammes.

Si les essieux étaient bien justes et tenus en bon état, le rapport du frottement à la pression pourrait ne pas être de plus d'un douzième, et alors le même chariot pourrait être traîné par $\frac{1}{216}$ de son poids, ou par une force de 23 à 24 kilogrammes. Mais $\frac{1}{12}$ est le moindre frottement que nous ayons observé, et dans des circonstances sur lesquelles on ne peut pas compter quand il s'agit de voitures d'une construction ordinaire: nous ne pouvions donc pas prendre nos exemples dans des expériences faites avec autant de soin. Comme on a fait beaucoup d'expériences sur la force nécessaire pour mouvoir les voitures sur les chemins en fer, il nous est facile de les comparer avec nos propres résultats.

MM. Stephenson et Wood ont, dit-on, constaté par l'expérience qu'un chariot chargé de 8540 livres avoir du poids (3927 kil.) n'exige qu'une force de 49 liv. (22,27 kil.) pour le tenir en mouvement. C'est un peu moins de $\frac{1}{174}$ du poids: mais les essieux de leur chariot avaient 3 pouces (76 mil.) de diamètre, et les roues 3 pieds (91 centimètres). Alors le rapport du frottement à la pression n'aurait été que de $\frac{10}{145}$, ou moins d'un quatorzième.

Dans une expérience que nous avons citée au commencement de ce Traité (p. 16), le rapport de la force à la charge est $\frac{1}{170}$. Il est très vraisemblable que les chariots étaient semblables, quoique peut-être leurs essieux fussent plus petits, car le chariot de l'expérience précédente est dit peser 2604 livres (1183 kil.).

Nous pouvons conclure que ces résultats ne sont pas propres à faire connaître la résistance moyenne qui a lieu sur un chemin en fer.

Une autre expérience, rapportée aussi dans ce Traité (p. 36), et qui a été faite sur le chemin en fer de Penrhyn, donne $\frac{1}{87}$ pour le rapport de la force à la charge. Les roues avaient 14 pouces (355

millim.) de diamètre, et les essieux vraisemblablement $1\frac{1}{2}$ pouce (38 mill.); et dans ce cas le rapport du frottement à la pression était de $\frac{1}{39}$.

La partie du train de chariots qu'un cheval conduisait dans cette expérience de Penrhyn était: en marchandises, 12 tonneaux, en poids de chariots, $2\frac{1}{2}$ tonneaux, en tout, $14\frac{1}{2}$ tonneaux ou 32500 livres (14772 kil.). Le sinus de l'inclinaison était $\frac{1}{96}$; ainsi, d'après la règle que nous avons donnée pour la descente sur les chemins en fer inclinés $32500\left(\frac{1}{87}-\frac{1}{96}\right)=35$ livres, ou à peu près 16 kilogrammes pour la force qui conduisait les 32500 liv. à la descente.

Pour remonter les chariots à vide sur cette route, la force doit être $2\frac{1}{2}$ tonneaux ou 5600 liv. $\left(\frac{1}{87}+\frac{1}{96}\right)$ $=123$ livres (56 kilogrammes) à peu près; ce qui prouve que dans la construction de ce chemin on n'a pas pris l'angle d'inclinaison le plus convenable. Le tirage moyen d'un cheval est à cette montée de $\frac{35+123}{2}=79$ livres (près de 36 kilogrammes), et la distance parcourue par jour est d'environ 15 milles (24 kilomètres). Mais comme ce travail est de beaucoup inférieur à la force

moyenne d'un cheval, nous devons en inférer que la résistance est un peu plus grande que ne l'indique l'expérience.

Sur le chemin en fer du comté de Surrey, le diamètre des roues est de 32 pouces (81 centimètres) et celui des essieux de $2\frac{3}{8}$ pouces (60 millimètres); on a donc $\frac{2\frac{3}{8}}{8 \times 32} = \frac{1}{108}$ pour le frottement à l'essieu; et en supposant que la résistance sur le chemin même ne soit que de la cinquième partie de cette quantité, la résistance totale sera $\frac{1}{108} + \frac{1}{540} = \frac{6}{540} = \frac{1}{90}$. Donc la force nécessaire pour tirer 12 chariots sur une inclinaison de 1 partie sur 120, comme est celle de cette route, serait de $85568 \left(\frac{1}{90} - \frac{1}{120}\right) = 241$ livres, ce qui est trop pour un cheval, quoiqu'un fort cheval pût soutenir cette fatigue pendant un temps aussi court. Il est très vraisemblable que nous avons évalué le frottement sur l'ornière de ce nouveau chemin plus haut qu'il ne fallait. Mais puisqu'un cheval conduit un chariot chargé de 3 tonneaux, ce qui fait un poids total d'environ 4 tonneaux, nous pouvons, en employant les mêmes données, chercher quelle force il faut qu'il emploie pour monter cette inclinaison. Notre règle

(p. 71) donne $8960\left(\frac{1}{99}+\frac{1}{120}\right)=176$ livres (80 kilogr.); ce doit être à peu près la véritable résistance; ainsi nous pouvons regarder comme assez approchant de la vérité, que la résistance à l'endroit des ornières, sur une route en fer à ornières larges, est d'environ la cinquième partie de la résistance à l'axe des roues. Si nous prenions le rapport $\frac{1}{60}$ au lieu $\frac{1}{90}$, la résistance serait alors plus grande que celle que les chevaux paraissent avoir à surmonter.

On a fait beaucoup d'autres expériences sur l'effet produit par les chevaux sur les chemins en fer (*), mais elles sont défectueuses, parce qu'on

---

(*) Le *Repertory of Arts*, vol. XIII, pag. 167—171, rapporte quelques expériences faites en 1799 par M. Wilkes de Measham, sur les charges qu'un cheval peut traîner sur une route en fer. Un cheval traînait 21 chariots chargés de charbon, et formant ensemble un poids total de 37 ½ tonneaux. La pente était de 1 partie sur 115, et le cheval la montait facilement. Le même cheval tirait aisément, en descendant, la septième partie de la même charge, ou 5,36 tonneaux. Maintenant, si nous supposons la même force de traction dans les deux directions, nous trouverons pour le frottement $\frac{n+1}{115(n-1)}=\frac{7+1}{115\,(7-1)}$

n'y donne pas le rapport des roues avec les essieux. Quoi qu'il en soit, on a pu voir par la comparaison de celles qui précèdent, que le rapport du frottement à la charge, tel qu'il est établi par nous, ne s'éloigne guère de celui que donne la pratique.

Il ne faut pas perdre de vue, dans la construction des voitures, que la charge doit être placée le

---

$=\frac{1}{86}$; c'est-à-dire que la résistance causée par le frottement était égale à $\frac{1}{86}$ de la charge. Et pour la force de traction 37 ½ tonneaux, ou 84,000 $\left(\frac{1}{86}-\frac{1}{115}\right)=243$ livres avoir du poids (110 kilog.).

Le même cheval remontait 3,2 tonneaux sur une pente de 2 parties sur 41. Ainsi, il était en état de faire un effort de traction égal à 7168 $\left(\frac{1}{86}+\frac{2}{41}\right)=430$ livres (195 kilog.); et dans cette expérience on fut obligé d'enrayer les roues: la charge était donc la plus grande que le cheval pût traîner.

Dans une autre expérience, faite à la mine de Brinsley par M. Wilkes, le frottement, calculé de la même manière, est de $\frac{1}{76}$. Ce sont des résultats extrêmes relativement à la force d'un cheval, et ils ne sont bons que pour montrer quel effet peut être produit pendant quelques instans quand la circonstance l'exige.

plus bas possible, surtout quand les plans inclinés ont une forte pente; car alors une charge élevée produit une pression très inégale sur les roues, et par conséquent sur les ornières qui les portent. Si le centre de gravité de la charge est élevé au-dessus du niveau des essieux d'une quantité égale à la moitié de la distance entre les essieux, tout l'effort de la charge portera sur les roues les plus basses dans un plan dont l'inclinaison sera de 45 degrés. (*Voy*. fig. 27.) Lors donc qu'on veut soulager les chevaux à la montée, il est avantageux que les roues de derrière soient plus grandes que les autres, parce qu'alors le plus grand effort s'exerce sur la paire de roues qui éprouve le moins de frottement, et au contraire, en descendant, les petites roues, qui éprouvent le plus de résistance, portent la plus grande partie de la charge. Par cet arrangement un cheval peut conduire une voiture sur des pentes où sans cela il serait entraîné par elle. Sur les routes ordinaires, l'avantage des roues inégales est encore plus grand; car sur une route de niveau la direction du tirage diminue la pression sur les petites roues; elles ont toujours tout l'effet de leur plus grand frottement quand le chemin descend, et les chevaux retiennent la voiture dans la direction la plus convenable pour augmenter cet effet.

Quand on connaît l'inclinaison de la partie la plus rapide du chemin, on peut déterminer la proportion entre la hauteur du centre de gravité et la distance entre les essieux de manière à ce que la pression sur les petites roues soit égale à une quantité donnée. Ainsi, si l'on veut la limiter aux $\frac{2}{3}$ de la charge, il faut multiplier le dénominateur de la fraction qui représente l'inclinaison par la distance entre les essieux, et la sixième partie du produit sera la hauteur à laquelle le centre de gravité de la charge pourra être élevé au-dessus du niveau des essieux avant que la pression sur les petites roues soit égale aux $\frac{2}{3}$ de la charge (*). Si, par exemple, l'incli-

(*) La pression de l'essieu des petites roues sera..... $= \frac{W \times AC}{AB}$ (fig. 26); mais $AC = \frac{1}{2} AB + h$ tang i, d'où l'on tire $\frac{W \times AC}{AB} = W\left(\frac{1}{2} + \frac{h \text{ tang } i}{AB}\right)$, qui ne doit pas être plus grand que n W. Par conséquent on doit avoir $\frac{1}{2} + h$ tang $i = n$, ou $\frac{n - \frac{1}{2} AB}{\text{tang } i} = h =$ la hauteur du centre de gravité au-dessus du niveau des essieux, et l'essieu le plus bas soutiendra toujours l'effort entier de la charge quand $\frac{AB}{2 \text{ tang } i}$ sera égal à h. Par exemple, pour 45°, la tangente égale 1 et $\frac{AB}{2} = h$. Quand $n = \frac{2}{3}$, $\frac{AB}{6 \text{ tang } i} = h$.

naison était d'un cinquième, c'est-à-dire d'une partie perpendiculaire sur cinq parties horizontales, et que la distance entre les essieux fût de 122 centimètres, alors $\frac{5 \times 122}{6} = 101,6$ centimètres. C'est un peu plus de 1 mètre pour la hauteur du centre de gravité de la charge au-dessus du niveau des essieux, quand la pression sur les petites roues n'est que les $\frac{2}{3}$ de la charge.

Lorsqu'on se sert de chevaux pour traîner des chariots sur un chemin en fer, les traits doivent être attachés de manière à ce que le tirage se fasse en montant; cette direction donne à la force des chevaux pour faire avancer une voiture le même avantage qu'on obtiendrait en fixant les traits au-dessous du niveau des essieux si l'on employait des roues élevées (fig. 28).

Lorsque les voitures conduites par des chevaux doivent avancer avec une trop grande vitesse, il est nécessaire qu'il y ait des chevaux en arrière ou à côté de la voiture afin de prévenir les accidens. Peut-être obtiendrait-on la même sûreté, si le timon de la voiture agissait sur une pièce de bois ou de fer à la circonférence des roues, aussitôt que le cheval retiendrait en reculant.

Examinons maintenant la nature des essieux. Quand la route est droite, il est indifférent que

les essieux tournent ou qu'ils soient fixes; mais, comme l'a remarqué le docteur Young dans sa Physique, toutes les fois que le mouvement s'écarte de la ligne droite, les roues qui sont fixées sur un simple essieu doivent être, l'une tirée en avant, l'autre poussée en arrière. Nous croyons donc qu'il vaut mieux que les roues tournent sur des essieux fixes; il y aura moins de danger pour les roues et les barres de fer qui forment les ornières des parties courbes de la route, et il faudra aussi moins de force; tandis que, quel que soit l'arrangement, il est impossible qu'il n'y ait pas quelque perte de force à raison du frottement latéral contre les rebords des ornières.

Comme il est très important que les roues ne puissent pas quitter l'essieu, on a imaginé un grand nombre de moyens de les y retenir sûrement. Une des premières conditions de toute bonne méthode de ce genre est la simplicité; il faut qu'elle soit facile à comprendre et difficile à mal appliquer; et comme la roue doit être maintenue dans sa position par un plus ou moins grand frottement contre les parties qui remplissent cet objet, il est évident que les points de frottement doivent se trouver le plus près possible du centre de mouvement. Ces conditions nous font reconnaître tout de suite l'impropriété de quelques

uns des moyens qu'on a proposés, quoiqu'ils puissent remplir l'objet de sûreté qu'on a en vue.

Il ne paraît pas qu'on ait encore rien trouvé de plus sûr et de plus simple que l'esse ordinaire, à l'exception de ces inventions qui agissent à une plus grande distance du centre de mouvement. Celles qui partagent avec l'esse la propriété d'agir près du centre sont trop coûteuses pour des chariots ordinaires, et ne peuvent être utiles que quand un degré considérable de vitesse est nécessaire.

Les roues retenues par une esse peuvent l'être d'une manière plus sûre, en y ajoutant l'espèce de garde inventée par M. Padbury, et dont on trouve la description dans le 31e volume des Transactions de la Société des Arts. Le même principe a été nouvellement employé pour retenir les roues sur leur axe. Quoique peu propre pour cet objet, attendu qu'il place la surface qui sert à maintenir à une très grande distance de l'axe, cependant sa forme est très convenable pour servir d'une espèce de sauve-garde qui empêche la roue de quitter l'essieu dans le cas où l'esse vient à se casser ou à se perdre. Nous avons représenté cette invention telle qu'elle est exécutée à la mine de charbon d'Ayr, mais avec un léger changement,

dans la figure 29. Elle diffère de celle de M. Padbury, qui consiste en une vis; elle doit se trouver tout près du collet ou de la rainure dans laquelle elle doit être mise tant que l'esse est en place; et quand l'esse est sortie, par accident ou par négligence, elle maintient la roue dans l'essieu.

Les esses devraient être faites le plus fortes possible sans affaiblir l'essieu; et il ne faut jamais qu'elles soient trop minces, parce qu'elles sont très exposées dans ce cas à être brisées latéralement. Le fer le plus fort est celui que l'on doit choisir de préférence, et même on ne devrait pas regarder à ce qu'il en coûterait de plus pour les avoir en acier dur.

Les essieux inventés par M. Collinge sont les plus convenables pour les voitures destinées à aller très vite et à porter de petites charges.

Il faut pouvoir au besoin modérer la vitesse d'une voiture, ou l'arrêter tout-à-fait. A la descente du plan incliné d'un chemin en fer, par exemple, il faut un moyen de modérer la vitesse; et nous avons fait voir précédemment que dans les endroits mêmes où le chemin est de niveau, une voiture parcourt une distance considérable avant que sa vitesse soit détruite. Il est donc très important de pouvoir à volonté augmenter le frottement.

Sur les chemins en fer de la Tyne et de la Wear, la marche des chariots peut être réglée au moyen d'un frottement sur la surface des roues que produit celui qui conduit, en pressant l'extrémité d'un levier en bois courbe que l'on nomme l'escorte (*convoy*), dont le centre de mouvement est fixé sur le côté du chariot. En appuyant sur ce levier, on le force à frotter contre les surfaces opposées des deux roues de ce côté de la voiture, ce qui produit un effet proportionné à la pression qui a lieu sur le bras du levier.

Quand les roues tournent sur les essieux, ce moyen ne peut pas convenir, par la raison que si l'on n'appuyait que d'un côté, la voiture tendrait à sortir des ornières. On trouve dans la Physique expérimentale de Désagulier, la description d'une méthode pour opérer le même frottement à la fois sur les deux côtés d'une voiture (*), et pour lui donner l'intensité qui convient sans l'action constante du conducteur. Quoique moins simple que celle dont on fait usage sur les chemins à ornières de la Tyne, elle est très propre pour régler la vitesse aux descentes, ou pour arrêter tout-à-fait

(*) Desagulier's, *Experimental Philosophy*, vol. I, pag. 274.

une voiture dont les roues tournent sur les essieux. Elle pourrait être simplifiée, car il vaudrait mieux que son action sur chaque côté ne se fît pas séparément.

On trouve aussi, dans les Transactions de la Société des Arts (*), la description d'un moyen très ingénieux inventé par M. Rapson pour retarder le mouvement d'une voiture; mais il ne peut pas servir sur un chemin en fer, le frottement ayant lieu trop près du centre de mouvement. L'action de la force qui retarde est semblable au frottement qui a lieu par la méthode de Désagulier; mais par le moyen qu'a trouvé M. Rapson, le frottement peut être rendu beaucoup plus considérable sans qu'il soit besoin d'exercer une aussi forte pression. Nous allons, en conséquence, en expliquer la théorie, et nous montrerons comment il pourrait être appliqué aux chemins en fer.

Comme le frottement est proportionnel à la pression, ou que du moins on peut le considérer comme tel dans la pratique, notre premier objet doit être de déterminer la pression qui a lieu à la circonférence sur laquelle agit la partie qui

(*) *Transactions of the Society of Arts*, vol. XXXIII, pag. 137, 1815.

occasione le frottement. Soit *w*, figure 30, le poids ou la pression qui cause le frottement, et A une petite portion du *ralentisseur.* Alors la force W et l'effort qui a lieu à la jonction de la pièce A à la pièce voisine B, agissent sur la pièce A. Ces forces pressent la pièce A sur la circonférence de la roue; et si la direction et l'intensité de la force W est *ab*, elle doit être retenue par une force égale *bd*, et la pression perpendiculaire sur la surface de la roue sera mesurée par *bc*. Le parallélogramme *abcd* étant construit sur la direction des forces, la force produisant la pression sur la pièce suivante sera diminuée par ce qui s'exerce de frottement sur la première pièce, et ainsi de suite pour les pièces suivantes; mais le rapport des forces aux pressions sera constant, et la pression sera à la force qui la produit comme la distance entre les joints est au rayon du cercle qui passe par tous les points de jonction; car *ab* : *bc* :: *a*O : *ad*. Ainsi si *s* est le côté du polygone dont les angles correspondent aux joints entre les parties du *ralentisseur*, et si *n* est le nombre des côtés ou des parties du *ralentisseur*, *f* le frottement quand la pression est égale à l'unité, et *r* le rayon O*a*; alors

$$\frac{fsW}{r}\left[1+(1-f)+(1-f)^2+\ldots\ldots(1-f)^n\right]$$

= le frottement du *ralentisseur*; mais la somme de la progression est

$$\frac{1-(1-f)^n}{1-(1-f)} = \frac{1-(1-f)^n}{f};$$

donc $\frac{sW}{r}[1-(1-f)^n]$

= le frottement.

Maintenant le frottement augmente quand la valeur de n augmente, pourvu qu'on ne réduise pas à un plus grand degré la longueur entre les joints s; car plus n sera grand, moins il y aura de distance entre les joints. Quand le *ralentisseur* agira sur la moitié de la circonférence, le plus grand frottement aura lieu si $n = 2$. Alors $s = 1,4142$; et comme le frottement du sapin sur le fer est d'environ $\frac{1}{4}$ de la pression, on devra avoir deux pièces, et 0, 62 W sera égal au frottement. Si les pièces doivent embrasser les $\frac{2}{3}$ de la circonférence de la roue, alors deux pièces donneront le maximum, et le frottement sera 0,75 W. Si le frottement est étendu à toute la circonférence, dans ce cas, trois pièces donneront le maximum d'effet, et le frottement sera égal à W, c'est-à-dire égal au poids qui le produira.

Il faut bien faire attention que ces proportions ne sont que pour le cas où le frottement est égal au $\frac{1}{4}$ de la pression. On peut calculer celles qui

conviennent à d'autres rapports du frottement à la pression, à l'aide de la formule

$$\frac{sW}{r}\left[1-(1-f)^{s}\right].$$

Quand le *ralentisseur* doit agir sur toute la circonférence, il est évidemment avantageux de prendre séparément les moitiés; car alors le frottement est $2 \times 0{,}62\ W = 1{,}24\ W$, au lieu de n'être qu'égal à W. Et c'est ce que l'expérience a confirmé, les meilleurs *ralentisseurs* étant construits de cette manière.

Pour appliquer ces principes au mouvement des voitures, il faut remarquer qu'il est nécessaire que l'effet du *ralentisseur* soit assez grand pour pouvoir arrêter le mouvement des roues, quoiqu'on ne doive que très rarement employer autant de force; car alors les roues glisseraient sur le chemin, et les ornières, ainsi que les roues elles-mêmes, ne pourraient qu'en souffrir.

Nous avons trouvé par expérience qu'une voiture glisserait sur les ornières si les roues étaient arrêtées quand la force motrice est égale à $\frac{1}{6}$ du poids; par conséquent, l'action du ralentisseur sur les roues doit être égale à cette quantité. Supposons, dans ce cas, que l'effort sur la roue soit d'un tou-

neau, ou de 2240 livres avoir du poids, alors :

$$\frac{2240}{6} = 373, \text{ et } \frac{373}{0,62} = 600 \text{ livres}$$

à peu près. C'est la force qui serait nécessaire en A, fig. 31, pour arrêter la roue de manière à la faire glisser sur l'ornière, en supposant que la roue agît dans la direction indiquée par la flèche; mais une force de $(1 - 0,62)\,600 = 228$ livres (103 kilogr.) produirait le même effet si elle était appliquée en B. Supposons que dans le même temps un axe horizontal C agisse sur la roue opposée, et qu'il faille une force de 448 livres pour produire l'effet de cette action; la force d'un homme pour mouvoir un levier dans un cas semblable peut être évaluée à 50 livres (23 kilogr.), et $\frac{448}{50} = 9$ à peu près; c'est-à-dire que les leviers doivent être proportionnés de manière que la main de l'homme ait un mouvement de 9 pouces (228 millimètres), tandis que le point B se meut d'un pouce (25 millimètres). Il faudrait ajouter un ressort qui soutînt le *ralentisseur* tout auprès de la roue; et au moyen d'une bielle de combinaison D, le levier pourrait être à l'un ou à l'autre bout de la voiture.

CHAPITRE VI.

Choix d'une ligne pour la construction d'un chemin en fer. — Nivellement du terrain. — Détermination des inclinaisons, quand les marchandises suivent une route qui descend. — Montées, descentes, coupures dans le terrain; chaussées, ponts. — Largeur des routes en fer. — Largeur des terrains pour ces routes. — Chemins en fer pour les courriers de dépêches. — Places de passage et plates-formes tournantes.

Il est très peu de sujets dans la pratique de l'ingénieur qui exigent autant d'instruction, d'habileté et des idées aussi étendues sur les effets du commerce, que le choix d'une ligne de direction pour une route en fer ou pour un canal. C'est à peu près sur les mêmes objets que l'attention doit se porter dans les deux cas, mais il faut considérer aussi les propriétés particulières à chacun. Celui qui serait obligé de s'en rapporter aux connaissances des autres sur

quelque point important ne pourrait pas saisir dans son esprit la question sous tous ses rapports. Il est indispensable qu'il puisse voir dans son imagination l'exécution et l'effet de l'ouvrage quand il sera achevé; il faut qu'il combine les avantages à donner à certains points particuliers, avec l'attention convenable pour ne pas blesser les intérêts du commerce général, et qu'il soit en état de se tirer de toutes les difficultés qui se présenteront inévitablement en ouvrant une nouvelle ligne de communication au commerce.

Il est évident qu'indépendamment d'une entière connaissance de la surface du pays, il faut encore avoir celle de sa structure intérieure, et des minéraux qu'il renferme. Les mines métalliques, celles de marne ou de houille, les carrières de pierre à chaux et de pierre à bâtir, deviennent précieuses dans le voisinage d'un chemin en fer; elles sont alors une source de richesse pour ceux qui les possèdent.

Il faut comprendre aussi les intérêts de l'Agriculture, et ne rien négliger de ce qui peut être avantageux aux propriétaires sur les terres de qui on fait passer le chemin; car une route ne peut pas être ouverte sans inconvénient, pour me servir de l'expression la plus douce, pour la propriété qu'elle traverse, et il faut, autant que cela est

possible, compenser les inconvéniens par une grande attention à favoriser tout ce qui peut tendre à augmenter la valeur de la propriété. Le transport des fumiers, de la marne, de la chaux, doit être encouragé, comme avantageux aux deux parties, et le tarif des droits sur ces articles doit être assez bas pour que les frais de transport se trouvent seuls couverts.

Dans l'intérêt d'un canton manufacturier, on devra se souvenir que le temps est une affaire importante dans le commerce, et que la sûreté vient immédiatement après. Nous n'avons pas besoin de dire que l'économie doit aussi être prise en considération, mais il faut qu'elle soit réelle et non pas apparente. Ceci fait voir qu'un ingénieur doit être familier avec les calculs d'argent, et en état d'y réduire directement l'avantage ou le désavantage de creuser le terrain, d'y élever des chaussées, etc., afin d'obtenir une communication directe, comparés avec les détours d'une route plus longue : et ici, ce ne sont pas seulement les rentrées des capitaux et l'intérêt qu'ils produiront qui doivent être pris en considération, il faut aussi faire entrer dans le calcul les retards et les pertes de temps; et tout ce qu'il en coûtera de plus pour faire des coupures ou pour élever le terrain, et qui sera jugé équivaloir à l'importance

du temps épargné, doit être passé en compensation.

L'ingénieur qui saura que même dans la disposition des collines et des vallons, la nature a mis beaucoup de méthode, pourra plus facilement se décider dans le choix d'une ligne relativement à la surface de la contrée qu'elle doit traverser. Ces choses, qui, au premier coup d'œil de l'homme instruit, et toujours dans l'esprit des ignorans, semblent avoir été faites sans ordre et sans arrangement, sont le résultat de l'action uniforme de causes naturelles, et peuvent en réalité être tracées et décrites avec moins de difficulté qu'on ne pourrait le croire. Quand on veut faire le plan d'une étendue considérable de pays, les rivières et les ruisseaux sont ce qui donne l'idée la plus juste des élévations et des enfoncemens qui s'y trouvent ; ils indiquent tous les changemens d'inclinaison, et même avec un degré très considérable de précision pour l'homme dont l'œil est exercé. Il faut observer aussi que chaque rivière a son système de vallées (*), et qu'à l'excep-

(*) Un frère de l'auteur, et qu'il a eu le malheur de perdre en 1822, avait commencé, il y a environ six ans, un modèle en bois de l'Angleterre. Il devait être composé de carrés séparés, sur une échelle d'élévation cinq fois

tion de quelques cas où les eaux se perdent dans des cavités ouvertes dans le sol, un canton dont les hauteurs sont facilement tracées trouve l'écoulement de ses eaux dans la rivière qui le traverse et dans son système de vallées.

Lorsqu'on s'est fait une idée assez juste de la meilleure direction à donner à une route, la première chose à faire doit être de lever un plan plus exact, afin d'arrêter la ligne précise qu'on suivra. Nous conseillons à l'ingénieur qui en est chargé de le faire par lignes qui se coupent à angles droits, comme étant une méthode infiniment supérieure à celle de l'arpentage par triangles, pour lui donner une connaissance exacte de la superficie du

---

plus grande que celle du plan. Un de ces carrés est en partie fini, et une immense quantité de renseignemens relatifs aux niveaux, aux hauteurs, aux profondeurs, etc., étaient déjà rassemblés. Le principe d'après lequel l'exécution du plan devait être faite, consistait à creuser chaque rivière et chaque cours d'eau qui en dépendait, le plus exactement possible, et à faire ensuite les vallons et les collines. C'était une entreprise immense pour un individu; mais de quoi ne vient pas à bout l'enthousiasme? Celui qui animait le frère de l'auteur ne connaissait aucune difficulté, et il n'est que trop vraisemblable que l'ardeur immodérée avec laquelle il s'est livré à ces recherches a ruiné sa constitution.



pays. Peut-être, à l'aide d'une figure, serons-nous en état de rendre évident l'avantage de cette méthode. Soit AB (fig. 32), une portion de la direction projetée, et CD la largeur du canton qui doit entrer dans le plan. A des distances convenables, choisissez des stations *aaa* dont l'éloignement entre elles dépendra des changemens de niveau. Nivelez exactement la principale ligne AB, et les transversales *bbbb*, et tirez-les ensuite, comme on le voit dans la figure, sur le plan de la ligne de la route. Si la distance *bb* doit être considérable, une ligne de plus dans la principale direction peut être nécessaire. Les lignes hachées montrent la forme de la surface à la ligne AB, *bb*, *bb*, etc., sur le plan ; et les dernières étant des coupes à angles droits sur AB, il n'y a aucune difficulté à distinguer l'étendue de déblais et de remblais qu'on peut éviter en variant la position de la principale ligne. Au fait, un plan de cette espèce vaut mieux pour quelqu'un qui est familier avec les coupes que le modèle d'un pays.

Mais quand on cherche à fixer la ligne exacte, il faut savoir si les transports qui se feront sur cette route seront égaux dans les deux directions. Dans le cas d'égalité, la route doit être le plus de niveau qu'il est possible; mais si les transports

doivent être constamment inégaux, et se faire toujours dans la même direction, ce qui doit arriver pour beaucoup de chemins en fer, alors une pente conviendra mieux au commerce. Nous avons donné une formule algébrique pour trouver quelle inclinaison convient; nous plaçons ici une règle dans une forme plus populaire.

Règle. A la quantité de tonneaux sur chaque direction ajoutez le poids des chariots nécessaires pour conduire du côté où le transport est le plus considérable; divisez la plus grande somme par la plus petite, et faites du quotient augmenté de l'unité le dénominateur d'une fraction dont ce même quotient, diminué de l'unité, sera le numérateur; multipliez cette fraction par la fraction qui représente la résistance sur les ornières de fer, quand le chemin est de niveau, et le résultat sera la fraction qui fera connaître la pente la plus convenable pour ce chemin.

Supposons qu'il est constaté que pour 1000 tonneaux de marchandises quelconques qui suivront une direction, il n'y aura que 500 tonneaux qui suivront l'autre, et supposons que le poids des chariots qui conduiront 1000 tonneaux soit de 250 tonneaux; à 1000 ajoutez 250, poids des chariots, vous aurez 1250. Ajoutez également 250

à 500, vous aurez 750. Divisez 1250 par 750, vous aurez pour quotient 1,666. De ce quotient retranchez 1, vous aurez pour numérateur 0,666, et ajoutez 1 au même quotient, vous aurez 2,666 pour dénominateur, ce qui vous donnera la fraction $\frac{0,666}{2,666}$, ou $\frac{666}{2666} = \frac{1}{4}$. Maintenant si 1 kilogr. peut traîner 130 kilogr. sur la route de niveau, $\frac{1}{4} \times \frac{1}{130} = \frac{1}{520}$, ce qui indique que la route doit avoir une pente d'une partie sur 520, ou d'à peu près 2 mètres sur un kilomètre.

Si les chariots ne devaient remonter qu'à vide, alors on aurait

$$\frac{1250}{250} = 5 \text{ et } \frac{5-1}{5+1} = \frac{4}{6} = \frac{1}{1,5};$$

mais $\frac{1}{1,5} \times \frac{1}{130} = \frac{1}{195}$. L'inclinaison de la descente devrait donc être d'une partie sur 195, ou d'un peu plus de 5 mètres sur 1 kilomètre Il résulte évidemment de ces exemples, que ce point mérite qu'on y fasse attention, particulièrement lorsqu'on se sert de chevaux; car on doit perdre beaucoup de force lorsque celles dont on a besoin dans les deux directions opposées sont inégales.

Comme nous avons déjà examiné avec beaucoup de soin les circonstances qui se rapportent

aux niveaux ou aux plans inclinés, nous allons nous occuper des montées et des descentes.

Lorsqu'on doit employer, soit des chevaux, soit une voiture à vapeur, il faut éviter toute montée et toute descente qu'on ne pourrait franchir sans le secours d'une machine stationnaire, à moins qu'il n'en coûtât plus d'argent pour faire les déblais et les remblais que pour acheter la machine et les appareils qui en dépendent, et pour compenser les retards, etc. (*Voir* chap. VIII.)

Si l'on emploie des machines stationnaires dans l'étendue du chemin, et qu'elles soient de la même espèce que celles dont nous avons parlé, la hauteur de la montée et la profondeur de la descente seront assez indifférentes, pourvu qu'elles ne soient pas trop rapides, et les grandes coupures dans le terrain pourront être en partie évitées. Quand on rapporte des terres, la quantité d'espace qu'il faut faire servir aux talus indispensables des deux côtés de la chaussée dépend de la nature des matériaux qu'on emploie pour la former, car celle qui resterait parfaitement ferme, et résisterait aux injures du temps, si elle était faite de sable, de graviers, de débris de rochers ou de toute autre matière qui ne retînt pas l'eau, ne durerait pas même un hiver, si elle consistait principalement en argile.

Pour la terre ordinaire, un talus de 45° est suffisant, mais pour l'argile, il est souvent nécessaire de lui donner une pente de 34°, surtout si elle n'est pas mêlée avec des matériaux qui empêchent l'eau de séjourner dans les fentes qui s'y forment pendant les sécheresses. Ainsi, dans le premier cas, le rapport du talus à sa base est de 1 à 1, et dans le second, il est de 2 à 3. Mais dans d'autres circonstances, on peut donner au talus beaucoup plus de raideur, de sorte que sa base soit à sa hauteur comme 2 est à 3, ou même comme 1 est à 2. Il sera facile de juger quel talus sera capable de résister quand on connaîtra la nature des couches dans lesquelles on coupera, et quand on aura observé l'état dans lequel elles se trouvent dans les endroits voisins où elles peuvent être à découvert.

Quelquefois, si l'on a de bonne pierre à sa disposition, on peut traverser une ravine ou un enfoncement de terrain au moyen d'arcades dans le genre des anciens aqueducs. Il arrivera souvent, sans doute, que l'ingénieur chargé de construire un chemin à ornières de fer sera dans la nécessité de déployer sa science et son habileté dans la construction des ponts et des arches. Ce n'est que très nouvellement que les principes théoriques de la construction des ponts ont été bien établis;

un sujet aussi important demande qu'on lui consacre un traité spécial (*).

L'espace nécessaire pour un chemin en fer doit dépendre de la largeur de la voie des voitures, et du nombre de ces voies. La largeur a été fixée plutôt par l'opinion que par suite d'un examen approfondi du sujet. Mais il doit paraître évident que cette largeur doit avoir un rapport quelconque avec la hauteur de la charge, pour que la voiture puisse rester en équilibre constant sur les ornières. Dans un chemin en fer, il y a de plus à considérer qu'il ne faut pas que la pression sur l'ornière puisse être matériellement altérée par une pente très légère d'un des côtés de la route. On peut prendre pour règle générale de la largeur de la voie pour les voitures qui vont avec une vitesse de plus de 5 milles (8 kilomètres) par heure, que le centre de gravité ne doit être élevé que dans la proportion de 1 à $1\frac{1}{2}$ relativement à la distance entre les deux côtés de la voie, c'est-à-dire entre les deux rangs d'ornières ; mais les voitures sont souvent construites de manière

---

(*) On peut consulter sur les ponts l'article *Bridge*, du Supplément à l'*Encyclopédie britannique*, de Nappier, ainsi que l'article *Stone masonry*, maçonnerie en pierre, du même ouvrage.

que la hauteur du centre de gravité est égale ou presque égale à la largeur de la voie, ce qui peut bien ne pas entraîner d'accidens quand les voitures vont lentement; mais lorsque leur marche est rapide, si le centre de gravité ne se trouve pas placé dans les limites que nous venons d'assigner, elles courent risque d'être renversées par le plus petit obstacle. Sur une route ordinaire, la grande résistance à la surface des roues, et la force du moteur, tendent à empêcher la voiture de verser; mais sur une route en fer, la petitesse de la force motrice, et le peu d'augmentation de résistance à la roue sur laquelle porte l'effort de la charge, ne suffisent pas pour balancer l'effet qu'a sur cette charge la rencontre d'un obstacle; de plus, la manière dont le moteur se lie à la voiture n'est pas aussi favorable pour ramener celle-ci dans sa position. Ces circonstances demandent toute l'attention de celui qui est chargé de la construction d'un chemin à ornières de fer où les voitures devront faire jusqu'à 10 milles (16 kilomètres) par heure (*).

(*) Nous disons que 10 milles par heure sont un mouvement rapide, et plus nous y réfléchissons, plus nous trouvons de raisons pour persister dans cette opinion; et nous ne voyons aucun avantage réel à une plus grande

Puisque la largeur de la voie dépend du centre de gravité des chariots chargés, et que ce centre varie suivant la nature de la charge et la vitesse de la marche, il est évident que ce qu'on a de mieux à faire est de donner à la voie une largeur telle que, par la manière dont on placera la charge, le centre de gravité puisse toujours se trouver placé dans les limites qui conviennent, soit que la marche de la voiture doive être lente, soit qu'elle doive être accélérée. On ferait très bien d'adopter

---

vitesse, à moins que ce ne soit sur un chemin en fer destiné aux courriers du cabinet, ou à ceux qui portent les dépêches, cas où la voiture légère qui porte le courrier et les dépêches peut être mise en mouvement par un homme qui y serait assis de manière à pouvoir agir à peu près comme fait un rameur. Sur une route en fer construite pour une voiture aussi légère, et dont la charge serait suspendue plus bas que les essieux, on pourrait aller avec une très grande vitesse, quand l'habitude l'aurait rendue supportable. Peut-être, dans quelques circonstances très rares, et où l'on aurait besoin de transmettre avec beaucoup de rapidité des avis ou des lettres, pourrait-on essayer ce moyen : s'il avait du succès, on pourrait l'adopter pour le transport des malles-postes; mais il est tout-à-fait improbable qu'un mode général de transporter des voyageurs avec une vitesse plus grande que de 10 milles (16 kilom.) par heure pût réussir.

pour tous les chemins en fer la même largeur de voie, et la même pression sur chaque roue. Nous conseillerons de donner 4 pieds 6 pouces (13 à 14 décimètres) à la voie des grosses voitures, et 6 pieds (18 décimètres) pour les voitures légères destinées à aller rapidement. Alors pour une route simple, la largeur de dehors en dehors des ornières de fer serait de 5 pieds (15 décimètres), on laisserait de chaque côté 3 pieds (9 décimètres), pour les piétons, et 4 pieds (12 décimètres) pour les fossés et les haies, ce qui ferait en tout 19 pieds (57 décimètres). Si la voie était de 18 décimètres, alors la largeur entière serait de 62 à 63 décimètres.

Pour une route double, on mettra 12 décimètres entre les voitures, ce qui donnera une largeur totale de 85 décimètres pour les grosses voitures, et de 97 décimètres pour les voitures légères. Une route double pour l'une et l'autre espèce de voiture n'exigerait pas moins de 17 mètres de largeur.

Quand on entreprend une route d'une largeur aussi considérable, il faut avoir soin de bien combiner les déblais et les remblais, afin d'employer le moins de travail possible au remuement des terres; la somme des déblais et des remblais, multipliés chacun par l'espace dans lequel la terre est

remuée, doit être un minimum (*), il faut plus d'adresse qu'on ne le croirait pour ouvrir le terrain sur une pente de colline; car il ne faut pas oublier qu'un chemin en fer doit s'écarter le moins possible de la ligne droite, et les côtés des collines ont généralement de la courbure.

Dans tous les chemins en fer, il est nécessaire de laisser des passages dans certaines parties de la route, et ces passages doivent être très fréquens, quand il n'y a qu'une seule voie. Sur les chemins de passage, à côté de la route en fer, on ferait bien de placer des plates-formes tournantes pour changer la direction des voitures, soit pour retourner, soit pour entrer dans un embranchement de route; il nous semble dangereux d'avoir sur la ligne principale d'un chemin en fer des plates-formes faites pour tourner ou pour glisser.

(*) Le lecteur curieux d'étudier ce sujet, peut consulter l'ouvrage de Gauthey, sur la *Construction des ponts*, tom. II, pag. 195 et 391, ou la *Science des ingénieurs* de Bélidor, liv. III, chap. 8, et la note de l'éditeur, édition de 1814.

CHAPITRE VII.

Construction des routes en fer. — Des barres de fer pour ces routes. — Avantages des barres longues. — Forme, largeur et force des barres en fonte. — Effet de la percussion. — Forme, largeur, force et durée des barres en fer forgé. — Construction de la route, écoulement des eaux, manière de placer les supports des barres. — Longueur des barres pour rendre la dépense le moins considérable possible. — Des matériaux qu'il convient le mieux de mettre en contact avec les barres de fer. — Construction des chaussées. — Routes sinueuses. — Force et forme des barres pour les ornières plates.

En traitant de la construction des routes en fer, il convient d'examiner d'abord la force et la forme qu'il faut donner aux barres qui les composent, et d'expliquer ensuite la manière de les fixer. Après avoir suivi cette marche pour les routes à ornières étroites, nous expliquerons la forme des ornières plates, et nous dirons quelle force elles doivent avoir, principalement dans

leur emploi pour un service temporaire; car, ainsi que nous l'avons déjà dit, elles ne sont pas bonnes pour les routes permanentes. La force que nous avons assignée aux barres est la plus petite qu'on doive leur donner, et pour un chemin sur lequel les transports sont considérables, la force devrait être augmentée dans la proportion que nous indiquons pour ce cas.

Des barres pour les chemins en fer.

On emploie avec succès deux espèces de barres pour ces chemins, des barres en fer forgé et des barres en fer coulé. Il n'est guère probable que le fer forgé puisse durer autant que la fonte quand il est exposé à l'action de l'air et à l'humidité, dont il doit être en général continuellement frappé sur un chemin de cette nature; mais il offre des avantages très importans, et que nous allons faire connaître ici, parce que cette explication a un rapport direct avec l'examen de la force et des proportions qui conviennent aux ornières.

Les barres en fer coulé sont plus sujettes à la fracture que celles en fer forgé, même lorsqu'elles proviennent de la fonte la meilleure et la plus dure; et la force qui romprait une barre en fer coulé ne causerait à une barre en fer forgé qu'une

altération permanente peu sensible, et qui n'interromprait pas le passage des voitures sur un chemin en fer. De plus, on peut donner aux barres de fer forgé une longueur considérable, tandis que celles en fer coulé n'ont d'ordinaire que de 1 mètre à 1 $\frac{1}{2}$ mètre de long; de sorte que la barre en fer forgé est plus propre à bien lier ensemble les parties d'un chemin en fer, et que les joints y opposent moins d'obstacles aux voitures. Mais, soit que des barres longues se fassent en fer forgé ou en fer coulé, il est très essentiel qu'elles soient appuyées sur des supports intermédiaires, et ce n'est que la difficulté d'arranger ces supports de manière à ce que les barres portent également sur eux, qui empêche d'employer des barres de fer coulé d'une longueur considérable; car ce fer fléchit si peu avant de se rompre, que si l'un des supports venait à s'enfoncer d'une très faible quantité, la barre serait presque sûrement rompue. Dans le même cas, au contraire, une barre en fer forgé ne fait que prendre une courbure durable. Dans une route dont le fond serait très solidement établi, il y aurait de l'avantage à se servir de barres de fonte d'une plus grande longueur; mais la raison que nous venons de donner fait que nous n'aurions pas de confiance dans des supports intermédiaires.

Les raisons qui doivent faire préférer les barres les plus longues sont l'augmentation de force qu'on obtient sans augmentation de dépense en matière, et l'avantage d'avoir moins de joints. La barre courte AB (fig. 15) n'est pas aussi forte que la partie du milieu CD (fig. 16) d'une barre trois fois plus longue. Si les bouts EF de la longue barre étaient solidement fixés, la partie du milieu CD porterait près de deux fois le poids qu'elle pourrait supporter si on la coupait de la longueur CD, ayant l'avantage de la force de la barre en C et en D. Les parties EC et DF sont aussi beaucoup plus fortes que si elles étaient divisées en petites barres. Cependant dans cet arrangement la force est inégale, mais on pourrait la rendre presque égale en divisant toute la longueur de la barre en sept parties, et en prenant trois de ces parties pour la distance des supports du milieu, comme dans la fig. 17; et s'il y a un nombre quelconque d'autres supports intermédiaires, il suffira que les espaces vers les bouts soient aux espaces du milieu comme 2 : 3. Cette manière de supporter les longues barres de fer forgé les rend presque entièrement de force uniforme.

Barres en fer coulé, pour les ornières étroites.

Relativement aux barres en fer coulé, nous avons à considérer leur forme, la largeur de leur face supérieure, et leur force. La forme doit être celle qui donne le plus de force en employant le moins de matière. Mais dans nos recherches sur cette forme, il faut se souvenir qu'il faut en choisir une qui permette le moins possible d'inflexion quand la charge se trouve sur le milieu de la partie de la barre qui ne porte pas sur les appuis; car il est très évident que cette inflexion doit avoir l'effet d'une surface raboteuse, en rendant le mouvement des voitures irrégulier, et en augmentant le tirage. La largeur étant uniforme, le contour de l'épaisseur doit être une demi-ellipse, de sorte que la barre puisse avoir la même force dans tous les points pour résister à une charge qui roule sur elle. Mais nous avons fait voir, dans notre *Essai sur la force du fer coulé*, qu'en adoptant la figure d'égale résistance, on a une augmentation de courbure dans le rapport de 9 à 7; et comme la quantité de matière qu'on peut épargner n'est pas considérable quand la coupe transversale de la barre est de la forme la plus convenable, il vaut mieux se servir de barres d'épaisseur uniforme.

Pour déterminer la forme de la section transversale d'une ornière en fer, il faut savoir quelle largeur aura le bord sur lequel les roues seront portées. Cette largeur doit évidemment être proportionnelle à la charge qui pèsera sur une roue, quand le diamètre des roues sera le même. Mais plus le diamètre d'une roue sera grand, plus il y aura de surface en contact, et par conséquent les grandes roues exigent moins de largeur que les petites. Si l'on ne veut pas avoir égard au diamètre des roues, il suffira, dans la pratique, de régler la largeur des ornières sur l'effort auquel elles auront à résister.

Nous avons observé que dans le voisinage de Newcastle la largeur du bord supérieur des barres qui sont en fonte est de 2 pouces (50,7 millim.), et que l'effort sur chaque roue est de 1 tonneau, ce qui donne cette proportion 1 ton. : 2 p. :: W le poids sur une roue : 2W. C'est-à-dire que la largeur en pouces doit être double du nombre de tonneaux qui pèsent sur une roue, ou qu'on doit donner à l'ornière un demi-pouce de largeur par tonneau de charge sur une roue.

La largeur moyenne ne doit pas être au-dessous de la moitié de la largeur du bord supérieur, et la moindre largeur de la section, pas au-dessous de la moitié de la largeur moyenne ou du quart

de la largeur du bord supérieur, et dans aucun cas elle ne doit être de moins de ½ pouce (13 millim.). Ces proportions convenues, la quantité de matière peut être arrangée de manière à lui donner le plus grand degré de force en diminuant la largeur vers le milieu de l'épaisseur, et en l'augmentant vers les bords supérieur et inférieur, où elle sert davantage à résister à la pression latérale. On peut voir cette forme dans la fig. 14 des planches.

En adoptant ces proportions, on rend très facile le calcul de la force des ornières, ainsi que celui de leur poids. La distance entre les roues d'une voiture portant sur la même ornière doit être telle, que la partie de l'ornière non appuyée n'ait jamais à porter qu'une roue à la fois; et afin d'être en garde contre toute augmentation d'effort sur une ornière inclinée, contre les accidens, les défauts dans la fonte ou toute autre chose, les barres doivent être assez fortes pour pouvoir porter le double du poids qui est supposé devoir porter sur chaque roue, et cela indépendamment de l'avantage que l'on obtiendra en arrangeant la section transversale de la manière la plus favorable à la force. L'épaisseur de l'ornière se trouvera en multipliant la distance entre les supports, exprimée en pieds, par 5,27; la racine car-

rée du produit sera l'épaisseur en pouces (*).

Exemple. Si la distance entre les supports est de 3 pieds, alors $5{,}27 \times 3 = 15{,}81$, dont la racine carrée est un peu moins de 4 pouces; ainsi on peut prendre 4 pouces (10 centimètres) pour l'épaisseur : et si la charge est de 1 tonneau sur chaque roue, la largeur du bord supérieur sera de 2 pouces, la largeur moyenne de 1 pouce, et celle au milieu de l'épaisseur de $\frac{1}{2}$ pouce.

L'aire de la section de la barre est égale à l'épaisseur multipliée par la largeur moyenne; elle est par conséquent de 4 pouces carrés, et le poids de la barre ou de l'ornière de 3 pieds de long est de $4 \times 3 \times 3{,}2 = 38{,}4$ liv. (à peu près 17,5 kilogrammes) (**).

(*) Soit w le poids sur une roue, exprimé en tonneaux de 2240 livres avoir du poids (1018 kilog.), l la distance entre les supports, en pieds anglais; alors on a (voy. l'*Essai sur la force du fer coulé*, art. 106), $\frac{2240wl}{850} = bd^2$, pour des barres en fonte; ou $5{,}27wl = bd^2$, en supposant l'effort sur la roue double de l'effort réel calculé, afin d'être en garde contre les accidens. Mais nous avons dit que la largeur moyenne devait être évaluée à la moitié de celle du bord supérieur; par conséquent lorsque $w = 1$ tonneau, $b = 1$ pouce, et pour toute autre charge, la largeur est dans la même proportion : donc $5{,}27l = d^2$ ou $\sqrt{5{,}27l} = d$.

(**) La pesanteur spécifique de la fonte est de 7,207;

Pour la commodité des lecteurs, on a donné à la fin de ce Traité une table qui indique l'épaisseur, la largeur et le poids des barres pour ornières de différentes longueurs et pour des charges différentes; mais dans les routes en fer d'une grande importance par l'étendue du commerce dont elles sont l'intermédiaire, les largeurs doivent être augmentées d'un tiers à peu près. La raison en est qu'en calculant la hauteur dont il suffirait qu'une roue tombât pour faire rompre une ornière de la force de celle de l'exemple précédent, on est conduit à croire qu'une roue chargée du poids de 1 tonneau qui tomberait d'un obstacle dont l'élévation au-dessus de l'ornière ne serait que d'un peu moins de $\frac{1}{4}$ de pouce (6 millim.), en occasionerait la rupture (*). Les barres qui ont plus de longueur résistent mieux à la percussion que les courtes. Une barre d'une longueur double résisterait à la chute d'une roue qui tomberait de $\frac{3}{8}$ de pouce.

---

un pied cube anglais de cette matière pèse 450,4 livres avoir du poids, ce qui donne un peu plus de 3,1 livres pour le poids de 1 pied de longueur sur 1 pouce d'équarrissage. On suppose ici 3,2 pour ce poids.

(*) Voyez l'*Essai sur la force du fer coulé*, art. 271.

Ornières en fer forgé.

On n'a encore employé le fer forgé que pour les ornières étroites, et nous avons déjà fait remarquer qu'elles ont l'avantage de lier les parties de la route et de donner de la force aux barres elles-mêmes. Mais l'on a observé (*) que les charges considérables qui pèsent sur les roues étendent les petites lames dont les bords supérieurs des ornières se composent, et font qu'à la longue ces surfaces sont enlevées par écailles. Cet inconvénient est très grave; il résulte de deux circonstances qui, prises à part, n'auraient chacune que très peu d'influence. En premier lieu, toutes les ornières en fer forgé sont trop légères. On a trouvé qu'un excès de charge ne les fait pas rompre, mais qu'il en résulte seulement une courbure permanente proportionnée à leur degré de faiblesse, de sorte que les fibres du bord supérieur perdent leur élasticité et leur énergie. Il est possible que cela seul ne forçât pas la surface à se détacher en écailles, si la manière dont ces barres sont fabriquées n'était pas aussi pernicieuse

(*) Rapport fait par M. Chapman, sur une route en fer allant de Newcastle à Carlisle.

pour elles. On les fait en les passant entre des rouleaux; et comme la section transversale des ornières ordinaires étant irrégulière, leur forme naturelle, quand elles sont passées au rouleau, serait une courbe, c'est en les redressant qu'on détruit leur structure. En faisant consister la coupe transversale d'une barre en parties égales et semblablement disposées (et une ornière faite ainsi est la plus forte avec la même quantité de matière), on tire avec les rouleaux une barre droite sans altérer ses bords extérieurs; et une barre d'épaisseur uniforme étant moins flexible que celle qu'on a diminuée vers ses points d'appui, il doit être beaucoup plus facile de fabriquer des ornières en fer malléable qu'on ne l'a cru jusqu'à présent.

Les ornières en fer forgé étant tout aussi douces, pour ne pas dire plus douces que celles de fonte, il est évident qu'elles doivent avoir une largeur au moins égale à leur surface supérieure; nous croyons même qu'elles devraient être plus larges: mais, en supposant que la même largeur puisse convenir dans les cas ordinaires, voici quelles doivent être à peu près les proportions de ces ornières:

1 pouce anglais (25,4 millim.) de largeur au bord supérieur pour chaque demi-tonneau de charge pesant sur une roue, et pour la largeur moyenne les $\frac{3}{8}$ de celle du bord supérieur. Si la force des barres

pour ornières est calculée de manière à ce qu'elles puissent supporter la pression réelle sur une roue sans dépression permanente quand elles sont de largeur moyenne, la force additionnelle que l'on gagnera par l'arrangement de la section transversale dans la forme la plus forte, tiendra lieu d'une plus grande quantité de matière, surtout si l'on a l'avantage d'employer des barres un peu longues; il faut excepter les plans inclinés, dont les ornières doivent être plus fortes dans la proportion de l'augmentation de pression qui s'y exerce.

On aura la force qui répond à 1 tonneau de charge sur une roue, en multipliant la distance entre les supports, comptée en pieds anglais, par 3,2. La racine carrée du produit sera l'épaisseur en pouces. Pour toute autre charge, on fera la largeur proportionnelle à la pression, l'épaisseur restera la même (*).

(*) Soit w le poids sur une roue, compté en tonneaux, l = la longueur d'un support à l'autre, comptée en pieds, b la largeur, et d l'épaisseur en pouces, on a, pour le fer forgé, $\frac{2240lw}{952} = bd^2$ (voyez *Essai sur la force du fer*, par Tredgold, art. 107, note), ou $2,36wl = bd^2$; et quand $w = 1$ tonneau, suivant la proportion établie plus haut, $b = \frac{3}{4}$, par conséquent $\sqrt{3,2l} = d$.

Si la distance entre les supports est de 3 pieds, alors $\sqrt{3,2 \times 3} = \sqrt{9,6} = 3 \frac{1}{8}$ pouces (79 millim.) à peu près; la largeur au bord supérieur sera de 2 pouces (50,8 millimètres), et la largeur moyenne $\frac{3}{4}$ de pouce (19 millimètres). Le poids d'une barre de fer forgé de 1 pied de long et de 1 pouce d'équarrissage, étant de 3,4 livres avoir du poids, l'aire de la section en pouces, multipliée par la longueur en pieds et par 3,4, donnera le poids en livres. La table VIII, à la fin de ce Traité, donne ces dimensions calculées pour tous les cas probables (*).

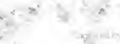
Les ornières en fer forgé n'ont encore été essayées qu'imparfaitement. Nous craignons qu'on ne trouve qu'elles sont de peu de durée, parce que nous savons que le fer forgé, exposé comme elles le sont aux effets de l'humidité, se détruit très rapidement. S'il fallait renouveler entièrement un chemin en fer forgé tous les quinze ou seize ans, les frais qu'il occasionerait l'emporteraient sur ses avantages. Nous avons pris beaucoup de renseignemens sur la durée probable de ces chemins,

(*) Le fer forgé pèse 7788 kilog. le mètre cube; ainsi une barre de 1 mètre de long et de 2,5 centimètres de côté pèserait 4,8765 kilogrammes, près de 5 kilogrammes. En fonte, elle ne pèserait que 4 $\frac{1}{2}$ kilogrammes.

et nous avons recueilli beaucoup d'opinions, mais pas un seul fait qui mérite d'être cité. Sans doute la décomposition du fer se fait lentement, mais elle est continuelle et constante, et avant d'employer cette matière à la construction d'une route de 40 à 50 milles, il faudrait être bien sûr du temps qu'elle peut durer. On ne peut mettre en doute la supériorité du fer forgé pour les routes, quand on veut que la vitesse des voitures y soit de plus de 3 milles à l'heure, s'il est prouvé que sa durée soit assez longue pour n'en pas rendre l'emploi trop dispendieux; car une ornière qui serait brisée causerait très vraisemblablement quelque accident sérieux à une voiture allant avec rapidité; et dans une route à ornières de fonte, celles-ci doivent être d'une très grande force, pour qu'on ne soit pas exposé à de semblables accidens.

On pourrait, afin de prévenir le déplacement d'une ornière brisée, dans les situations où cet accident est plus à craindre, établir un pavé au-dessous du chemin de fer, et appuyer l'ornière par un autre pavé à droite et à gauche. Dans tous les cas où le chemin en fer traverse une autre route, une rue, etc., ce moyen devrait être employé.

La manière de préparer la route pour recevoir les ornières en fer doit dépendre de la nature du



sol. S'il est ferme, il suffira d'en enlever la superficie, et de former la route en lui donnant l'inclinaison ou le niveau convenable; et partout où les supports ne seront pas à plus de 3 ou 4 pieds (9 à 12 décimètres), on fera un fossé de 2 pieds environ (6 décimètres) de large, et de 10 pouces (2,5 décimètres) de profondeur au-dessous de chaque rang d'ornières, avec des égouts en pierre sur les côtés, plus enfoncés, et placés à une distance convenable les uns des autres, afin de tenir la route toujours saine, les égouts en pierre devant avoir une pente dans la direction la plus favorable pour entraîner les eaux de pluie ou de sources qui pourraient se trouver dans le terrain.

Les tranchées au-dessous des ornières doivent être remplies de cailloux brisés, ou, à défaut de pierre, de bon gravier; et on devra préférer toujours pour cet usage la pierre la plus dure, quand on pourra s'en procurer.

Tout ceci étant fait comme il convient, on fera bien de passer un rouleau très lourd sur la route avant d'y placer les blocs de pierre qui doivent servir de supports aux ornières. Ces blocs doivent avoir une base assez unie, d'environ 16 pouces (4 déc.) carrés, mais plus large lorsque la charge sur chaque roue devra être de plus d'un tonneau. Leur épaisseur doit être à peu près la moitié de la

base. On bat avec la demoiselle la place où doit se poser le bloc, afin de la rendre très ferme, et on le met ensuite sur un lit de gravier fin ou de sable grossier, mais sans employer plus de sable qu'il n'en faut pour que chaque bloc porte bien solidement et bien également. Comme la bonté de la route dépend beaucoup de la manière dont les blocs sont placés, et du degré de précision avec lequel ils sont arrangés, cette partie de la construction doit être surveillée avec beaucoup de soin. Les traverses en fer et les ornières étant fixées sur les blocs, on forme le sentier sur lequel doivent marcher les chevaux et les autres sentiers latéraux avec les matériaux que fournit le pays; mais il faut, autant qu'on le peut, les rendre fermes et solides, car ils contribuent beaucoup à la solidité des blocs et des ornières.

Dans les terres douces, les tranchées doivent être plus larges et plus profondes; on les remplit de lits de pierre brisée, chaque lit devant avoir 7 à 8 pouces (18 à 20 centimètres) d'épaisseur, et être battu pour le rendre solide. Les mêmes précautions sont nécessaires partout où l'on trouve de l'argile, terre sur laquelle la sécheresse et l'humidité ont la plus grande influence.

Si l'on emploie des ornières plus longues, et il est des cas où la difficulté de rencontrer un sol

bien sain peut rendre ce moyen très convenable, ce qu'on peut faire de mieux est d'élever des murs en travers de la route à des distances convenables pour qu'ils puissent servir de supports aux ornières. Maintenant, il est évident que si un support quelconque est incapable de soutenir sans danger la moitié du poids d'un chariot, il est insuffisant pour l'objet auquel il est destiné: par conséquent, quel que soit le nombre des supports, il est nécessaire qu'ils aient tous la même force que s'ils étaient très écartés. Il y a donc une longueur d'ornières qui est plus économique que toute autre, parce qu'elle devient trop dispendieuse si elle passe cette longueur, ou bien les supports deviennent trop dispendieux si l'ornière est plus courte. Si l'on connaît ce que coûte un support, il est facile de calculer la longueur qui convient aux ornières par le moyen d'une équation qu'on trouvera dans notre *Essai pratique sur la force du Fer* (page 233 de la traduction, à la note); ouvrage auquel nous renvoyons le lecteur pour l'équation même. Nous nous bornons à donner ici la règle qu'on en tire et un exemple pour l'éclaircir.

Règle pour trouver la longueur la plus économique pour les ornières des chemins en fer.

Le prix du tonneau de fer rendu sur le terrain doit être connu, ainsi que celui des blocs, des traverses en fer, et de la main d'œuvre pour placer le support. Ces données supposées, divisez le prix en livres sterling du tonneau de fer par le prix d'un support; carrez le quotient, et multipliez ce carré par la largeur de l'ornière en pouces, et multipliez ce produit par la vingtième partie du poids, en livres avoir du poids, du chariot chargé; extrayez la racine cubique du dernier produit.

Enfin divisez 700 par la racine cubique que vous venez d'extraire, le quotient sera la distance en pieds entre les supports.

Exemple. Supposons que le prix d'un tonneau de fonte coulée en ornières soit de 14 liv. sterl. rendu sur place, et que les frais pour un support, matériaux et main d'œuvre compris, soit de 0,2 liv. sterl.; que la largeur du bord supérieur de l'ornière soit de 2 pouces, et que le poids d'un chariot chargé soit de 9000 livres avoir du poids.

Alors $\frac{14}{0,2} = 70$, dont le carré est 4900.

Maintenant $4900 \times 2 \times \frac{9000}{20} = 4{,}410{,}000$.

La racine cubique de 4,410,000 est 164, et $\frac{700}{164} = 4 \frac{1}{4}$ pieds, à très peu près.

Ainsi, avec ces conditions, des ornières en fonte de 4 pieds 3 pouces (13 décimètres) seraient les plus économiques sur ce chemin en fer. Mais si, par suite de la nature du terrain, ou par d'autres causes, les supports coûtaient 8 schellins chacun, ou 0,4 liv. sterl., alors on trouverait, en refaisant le calcul, que la longueur la plus économique pour les ornières serait de 6 $\frac{3}{4}$ (19 décimètres).

Le prix du fer, le poids du chariot chargé, et la largeur de l'ornière, doivent influer aussi sur la distance entre les supports, et par conséquent sur le prix de la route.

Nous ne donnons point la règle pour les ornières en fer forgé; mais, s'il en était besoin, on la trouverait facilement au moyen de l'*Essai sur le Fer* que nous venons de citer.

On doit prendre toutes les précautions possibles pour que les routes en fer restent sèches, soit en leur ménageant les égouts convenables, soit en faisant qu'elles se trouvent librement exposées au soleil et à l'air, soit en employant des matériaux qui n'absorbent et ne retiennent pas l'eau; et à l'égard des matériaux, les chemins à ornières de fer qui

servent aux mines de houille ou à d'autres mines offrent des avantages qu'on ne trouverait pas facilement dans les autres cantons. Quand on emploie des ornières en fer forgé, il est bon de les entourer d'un lit de cendre de houille ou de bois, de scories, etc., et d'éviter de les mettre en contact avec l'argile, la marne, la pierre à chaux poreuse et les pierres argileuses.

Dans les places où l'on a fait des coupures profondes, le chemin se trouve presque toujours privé du soleil, et par conséquent il exige plus de soin pour en égoutter les eaux.

Les chaussées en terre rapportée devraient être accompagnées de distance en distance par des espèces d'égouts verticaux, de pierres brisées ou d'autre matière non serrée, tant pour distribuer l'humidité dans la masse, afin de lui faire prendre plus vite toute son assiette, que pour empêcher qu'elles ne retiennent plus d'eau qu'il ne convient. Si les matériaux sont d'une espèce qui retienne l'eau, il faut établir des égouts vers la base afin d'empêcher qu'elle ne s'accumule; et partout où il est nécessaire de rapporter des terres, les ornières ne doivent être placées que provisoirement pour les fixer définitivement lorsque le terrain aura pris son assiette et acquis un degré permanent de solidité.

Lorsqu'on donne un degré considérable de courbure à une route en fer, les ornières de la courbe extérieure devraient avoir une légère élévation au milieu de la courbe, et les ornières devraient être plus fortes dans le sens latéral sur les deux lignes. L'effet de cette élévation légère au milieu de la courbe serait de modérer la tendance qu'a la voiture à s'avancer en ligne droite, sans frotter avec autant de force contre le bord de l'ornière que nous l'avons vu arriver dans des endroits où la route prenait une courbure considérable. Il faut, autant que possible, diriger ces routes en ligne droite; mais lorsqu'on se détermine à remplir un but quelconque en leur faisant suivre une ligne courbe, les ornières doivent être coulées ou forgées dans une forme convenable à ce cas; car il est impossible d'assembler des ornières droites sans qu'il y ait des angles, qui ont le double inconvénient d'occasioner un mouvement irrégulier et d'augmenter beaucoup la pression latérale sur les ornières.

Pour calculer la force des ornières plates, on peut les considérer comme un rectangle; et la force étant ainsi trouvée, on disposera la matière en donnant à la coupe la figure de plus grande résistance: voici la règle pour cette espèce d'ornières.

Règle. Multipliez trois fois la longueur de la

portée en pieds par l'effort sur une roue en tonneaux, et divisez le produit par la largeur en pouces; la racine carrée du quotient sera, en pouces, l'épaisseur de l'ornière, en supposant qu'elle forme un plan d'épaisseur uniforme. Si cette quantité de matière est arrangée dans la forme indiquée par la figure 19, elle sera assez forte pour l'objet.

Exemple. Si l'ornière plate doit avoir 4 pouces (10 centimètres) de large, 3 pieds (91 centimètres) de long, et que l'effort sur une roue soit des $\frac{3}{4}$ d'un tonneau : dans ce cas $\frac{3 \times 3 \times \frac{3}{4}}{4} = 1{,}69$, et la racine carrée de $1{,}69 = 1{,}3$. Ainsi une forme de 4 pouces de largeur, de 3 pieds de long et de 1,3 pouces d'épaisseur, disposée comme on le voit fig. 19, sera assez forte pour notre supposition. Une ornière semblable pèsera près de 50 livres (22,7 kilogrammes).

On a fait des ornières beaucoup plus faibles, et il en est résulté qu'elles ont manqué et que les routes n'ont jamais pu être en bon état. Si celles dont nous conseillons l'usage étaient faites uniformément, elles auraient précisément assez de force pour que la charge n'y pût pas produire d'altération permanente; mais en disposant la section dans la forme de la fig. 19, leur force serait presque doublée.

CHAPITRE VIII.

Evaluation de la dépense pour un chemin en fer. — Dépense annuelle. — Quantité de tonneaux dont le transport peut couvrir les frais. — Dépense en force des chevaux, en machines à vapeur roulantes, en machines stationnaires, en voitures et en hommes pour les conduire. — Frais de transport au moyen des chevaux, sur les chemins en fer, sur les canaux, sur les routes ordinaires. — Avantages relatifs des chemins en fer, des canaux et des routes ordinaires. — Dépense des déblais et des remblais, comparée avec celle des plans inclinés. — Règles pour déterminer l'épaisseur la plus économique qu'on puisse donner aux coupures du terrain. — Lignes directes inclinées, et lignes de niveau sinueuses comparées.

La dépense d'un chemin en fer comprend une foule de détails difficiles à faire entrer dans une évaluation, de sorte qu'il y aura toujours quelque incertitude dans celle qu'on voudra faire; mais il

est peut-être possible, en rangeant dans un certain ordre systématique les frais les plus ordinaires, d'aider à rendre moins nombreux ceux qui sont plus éventuels. Un objet plus important encore nous engage à porter notre attention vers cette partie : nous désirons nous mettre en état de comparer la valeur des différens moyens d'arriver au même but, et de nous assurer lequel, d'un canal, d'un chemin à ornières de fer ou d'une grande route ordinaire, vaut le mieux pour un commerce donné. Et comme, dans une entreprise très vaste où les capitaux ne peuvent rentrer que par petits paiemens, il faut s'attacher davantage à une méthode et à une économie réelle que dans des affaires moins importantes, le même mode d'évaluation peut s'appliquer à ses diverses parties. Le succès d'aussi grands ouvrages dépend entièrement des facilités et du bas prix des transports qu'y trouve le public; et par conséquent tout ce qui tend à augmenter les unes et à diminuer les autres mérite qu'on y fasse attention.

Il faut considérer d'abord la première dépense pour la construction d'une route en fer, ensuite celle qui aura lieu chaque année, et quelle quantité de tonneaux il faudra transporter pour couvrir cette dernière, en supposant qu'on puisse

établir avec quelque probabilité la quantité des transports qui auront lieu; et à la quantité de tonneaux transportés, il faudra ajouter ce qui sera nécessaire pour couvrir la dépense de la force motrice et celle des réparations des chariots, afin de connaître la quantité réelle des tonneaux qu'il faut être assuré d'avoir à transporter.

Si l'on veut évaluer une étendue donnée de chemin en fer, il faut connaître ce que coûtera une quantité plus ou moins grande des ouvrages que voici :

1. Frais des recherches pour déterminer le choix de la ligne sur laquelle sera établie la route; de la levée des plans et du nivellement de la route; des travaux pour aplanir le terrain et le mettre en état, etc.; et frais pour la direction et la surveillance de ces ouvrages.

2. Valeur de la terre occupée par la route, des déblais, des remblais, des places de passage, des haies, des fossés, des égouts, etc.

3. Dépense pour creuser, faire des chaussées, niveler le sol de la route.

4. Dépense en fossés, en égouts, en barrières, en portes.

5. Dépense en ponts, en murs d'appui.

6. Dépense en blocs pour porter les ornières; en cailloux brisés pour former le lit des blocs,

pour mettre dans les sentiers des chevaux; en gravier pour les chemins des piétons; en cendres pour placer autour des ornières; en main d'œuvre pour l'emploi de toutes ces choses.

7. Dépense en ornières, en traverses, en chevilles de fer, en main d'œuvre pour les placer ainsi que les pièces pour arrêter les voitures, et les plates-formes pour les détourner.

8. Dépense pour la construction des bureaux pour la recette des droits, des machines pour peser, des roues tournantes, des plates-formes pour transporter, des bornes milliaires, etc.

9. Dépense pour la construction des hangards pour les machines, et des machines pour les plans inclinés; pour les chaînes, les cordes, les rouleaux ; pour construire les puits; pour les pompes.

10. Dépense pour paver les passages qui traversent la route, les rues, etc.

11. Frais accidentels pour dommages aux propriétés particulières, pendant l'exécution des ouvrages.

Vient ensuite la dépense annuelle ; elle est plus incertaine que la première, mais en voici l'aperçu général :

1. Intérêt du capital employé, proportionné au succès probable de l'entreprise.



2. Réparation des ornières, des roues et des plates-formes tournantes, renouvellement occasionel de ces objets, main d'œuvre, soins journaliers.

3. Réparation ou reconstruction des sentiers, des barrières, des portes, des ponts; ouverture de fossés, d'égouts, etc.

4. Réparations aux bâtimens et aux machines des plans inclinés.

5. Dépense en combustible pour les machines des plans inclinés.

6. Appointemens de l'ingénieur en chef, des autres ingénieurs, des receveurs des droits, des commis, etc.

Toutes ces dépenses sont presque indépendantes de la quantité des transports qui se feront par la route, et dont il faut que la différence soit très considérable pour les rendre plus ou moins fortes; et avant de nous livrer à l'examen de la dépense que nécessite l'emploi des différentes sortes de moteurs, il sera peut-être utile d'avoir une idée du nombre des voitures de transport nécessaires pour rembourser le capital employé pour la construction d'un chemin à ornières, quand la première dépense est à peu près égale au terme moyen des capitaux qu'il est vraisemblable qu'on serait obligé d'employer, si l'on en-

treprenait de construire des chemins en fer dans différentes parties du pays.

La dépense moyenne d'une route en fer, bien faite, avec une double voie, ne saurait être, en Angleterre, de moins de 5000 livres sterling par mille, en y comprenant tous les frais que nous venons d'indiquer, et en supposant que tous les ouvrages sont bien solidement achevés (*). Maintenant, si le risque que l'on court en employant des capitaux pour établir un chemin en fer, joint au temps qu'il faudra attendre pour toucher des intérêts en partageant un dividende, est équivalent au risque que l'on court en les employant

(*) M. Chapman a évalué les frais de la route en fer de Newcastle à Carlisle à 3915 livres sterling par mille, et avec les améliorations proposées par M. Jessop, elle coûtera certainement à peu près la somme que nous avons prise pour terme moyen. On lit dans le *Quarterly Review*, n° 62, pag. 363, que le terme moyen général du prix d'un grand nombre de routes en fer à ornières étroites, à ornières plates, les unes en fer forgé, d'autres en fonte, et formant une étendue de plus de 500 milles, est à très peu près de 4000 livres sterling par mille, en leur supposant à toutes une double voie; et l'auteur de l'article remarque avec beaucoup de raison, que, d'après l'imperfection de ces anciens chemins, on est fondé à porter ce moyen à 5000 livres sterling par mille.



dans une entreprise de canaux (et nous ne croyons pas qu'il puisse y avoir une grande différence), la rentrée doit être évaluée à $8\frac{1}{2}$ à peu près pour cent du capital, et en supposant que l'intérêt actuel de l'argent soit de $3\frac{1}{2}$ pour cent, le dividende annuel qui remboursera le capital employé devra être, pour chaque mille, de $\frac{5000}{8\frac{1}{2}+3\frac{1}{2}}$ = un peu plus de 417 liv. ster. (10425 f.)

Les réparations, les renouvellemens et les autres dépenses annuelles relatives aux articles 2, 3, 4 et 5 de l'état précédent, n'iront guère à moins de 5 pour cent de leur valeur première, et cette valeur peut être portée, avec une exactitude suffisante pour notre objet, à 2000 livres sterling par mille. La dépense annuelle sera donc de 100 livres sterling par mille; celle pour les frais de recette, les commis, etc., peut être portée à 40 livres sterling par mille, ce qui fait une dépense annuelle totale de

$417 + 100 + 40 = 557$ liv. ster. (13925 fr.) par mille.

Comme il y a 240 *pences* dans une livre sterl. et que le nombre des jours de travail d'une année est de 312, on a $\frac{557 \times 240}{312} = 428$. Ainsi en faisant payer un *penny* ($10\frac{1}{2}$ cent.) par tonneau et par

mille, il faut que les transports soient de 428 tonneaux par jour, sans parler des frais du moteur; si les transports ne sont que de la moitié de cette quantité, il faut que le droit soit porté à 2 *pences* (21 cent.), et ainsi du reste à proportion.

Cet exemple peut donner quelque idée de la quantité de transports nécessaire pour qu'un chemin en fer puisse être une entreprise profitable; et afin de mieux faire comprendre l'étendue que doit avoir le commerce sur un chemin de cette espèce, nous dirons, en nous servant d'une mesure tout-à-fait propre à frapper les sens, qu'il faut que 142 chariots, chargés de 3 tonneaux chacun, parcourent chaque jour toute l'étendue de la route, s'ils ne paient qu'un *penny* de droit par tonneau par mille; mais qu'il ne faudra que 71 chariots, si le droit est de 2 *pences* par tonneau par mille.

Deux *pences* par tonneau par mille sont le droit le plus fort que l'on doive pouvoir établir pour couvrir la dépense d'un chemin en fer; de sorte que toutes les fois que l'on ne pourra pas compter avec une probabilité raisonnable sur un passage journalier de plus de 200 tonneaux, il sera très douteux qu'un chemin en fer puisse être une spéculation avantageuse.

La dépense moyenne d'un canal, dans des

circonstances semblables, peut être estimée le double de celle d'une route en fer; c'est donc 10000 livres sterling par mille (*). Les réparations et les autres frais seront aussi plus considérables que pour un chemin en fer; par conséquent il faut, pour que les droits ne soient pas plus élevés que ceux d'un chemin en fer, que la quantité de tonneaux transportés par jour soit à peu près double, pour donner les mêmes rentrées sur le capital employé. L'avantage des canaux dépend entièrement de la quantité de marchandises qui peut être mise en mouvement par une puissance déterminée. Mais nous renvoyons la comparaison de cette partie de notre sujet

(*) L'auteur d'un article inséré dans le *Quarterly Review*, n° 62, pag. 363, déduit d'une liste de devis de soixante-quinze canaux, qui comprend ceux dont la dépense est la plus forte et ceux dont elle est la moins considérable, un terme moyen qui porte à 7946 livres sterling par mille, les frais de construction d'un canal. Mais il est bien connu que ces ouvrages ont rarement été faits, si cela est jamais arrivé, pour le prix porté sur le devis, et dans plusieurs cas, il s'est élevé au double, comme pour le canal de *Coventry*, celui de *Birmingham* et de *Fazely*, le *Grand Trunk*, canal, et d'autres. *L'Union*, canal, a coûté 12000 livres sterling par mille; celui de *Forth and Clyde* en a coûté 12400. C'est pour ce dernier plus de 192000 fr. par kil.

après l'évaluation de la dépense qu'occasionent les différentes espèces de moteurs.

Une grande route ordinaire, dont le milieu de 16 pieds de largeur (48,6 décimètres), en chemin bien solidement fait, coûtera, terme moyen, environ 1500 livres sterling par mille, y compris le prix du terrain; et les réparations, si les transports par chariots y sont considérables, monteront à 100 livres sterling par an par mille. Maintenant, en supposant qu'on puisse compter sur une rentrée journalière de droits de passage, et en admettant que le capital employé a été emprunté à 5 pour cent, tenant compte de la perte du temps employé à mettre la route en état d'y percevoir des droits, la dépense annuelle, y compris les frais d'administration, ne sera pas de moins de 200 livres sterling par mille, et alors le nombre de tonneaux payant droits, nécessaire pour couvrir cette dépense, sera $\frac{200 \times 240}{312} = 154$ par jour, si l'on veut que le droit ne soit pas de plus d'un penny par tonneau par mille.

Il paraît donc qu'une route ordinaire sur laquelle on paie des droits convient lorsque les transports qui s'y font ne sont le $\frac{1}{3}$ de ceux qui rendent un chemin en fer profitable, les droits étant supposés les mêmes.

Ces comparaisons nous amènent à une autre partie de notre examen, savoir, quelle est la dépense qu'entraîne l'emploi des différentes espèces de moteurs.

La dépense relative des moteurs divers qu'on peut faire servir sur un chemin en fer est un sujet intéressant de recherche; et les mêmes données étant nécessaires pour évaluer la dépense absolue pour un temps et pour un lieu quelconque, il sera utile d'entrer dans quelques détails propres à faciliter les calculs de ceux qui voudront comparer les frais que nécessitent les différens moteurs.

La dépense annuelle pour un cheval consiste dans :

1°. L'intérêt de l'argent qu'il a coûté;

2°. La diminution de sa valeur;

3°. Le danger de le perdre;

4°. La valeur de sa nourriture;

5°. Les fers, les harnois;

6°. Le loyer de l'écurie;

7°. Les gages de celui qui le soigne;

8°. Les bénéfices de l'entrepreneur.

D'après la durée moyenne d'un cheval de l'espèce qui convient au service d'un chemin en fer, les trois premiers articles de ce tableau peuvent être portés à un quart du prix du cheval. La

nourriture, les harnois, les fers, etc., compris dans les articles 4, 5 et 6, ne dépasseraient vraisemblablement pas de beaucoup 40 livres sterling par an, et ne s'élèveraient pas non plus beaucoup moins haut que cette somme; et en supposant qu'un homme fût chargé de deux chevaux, ce serait une dépense de 15 liv. st. et 12 shel. de plus, en mettant ses gages à 2 shel. (2 fr. 50 c.) par jour. A ce taux, le travail d'un cheval de la valeur de 20 livres sterling coûterait 60 liv. sterl. 12 shellings (plus de 1500 francs) par an, ou, puisqu'il y a 312 jours de travail dans l'année, la dépense journalière d'un cheval serait de 3 shellings 10 $\frac{1}{2}$ pences, ou de 186 farthings; et en y comprenant le bénéfice de l'entrepreneur, elle irait à 216 farthings (5 fr. 62 c.) par jour.

Mais la force d'un cheval allant avec une vitesse de 3 milles (4826 mètres) par heure, et marchant six heures par jour, est de 125 livres avoir du poids (57 kilogr. à peu près). Or 6 fois 3 milles font 18 milles, et

$$18 \times 125 = 2250 \text{ livres},$$

ce qui donne, en déduisant le poids du chariot, à peu près $\frac{3}{4}$ de tonneau par mille; et nous avons fait voir qu'il n'est pas probable que la force motrice puisse transporter plus de 144 fois son équi-

14..

valent en poids, ou les $\frac{3}{4}$ de 144 = 108 ton. à 1 mille.

Donc, les frais de transport, au moyen de chevaux et sur une route en fer, surpasseront un farthing (2 $\frac{1}{2}$ centimes) dans le rapport de 216 à 108, pour le moteur seulement; c'est-à-dire qu'on peut calculer qu'il en coûtera 2 farthings (5 $\frac{1}{5}$ centimes) par tonneau par mille, pour le transport des marchandises conduites par chevaux sur un chemin en fer.

La dépense annuelle d'une machine locomotive à haute pression consiste dans :

1°. L'intérêt du capital employé pour la construire;

2°. La diminution de valeur;

3°. Les risques d'accidens;

4°. La valeur de la houille et de l'eau;

5°. Les renouvellemens des parties et les réparations;

6°. Les gages des employés;

7°. Les bénéfices de l'entrepreneur.

Il est difficile d'obtenir ces détails de l'expérience de ceux qui emploient les machines à vapeur; nous allons donc, pour donner un exemple, calculer sur des sommes que nous croirons propres à couvrir la dépense. Le prix de la machine et du chariot qui la porte peut être

estimé à 50 livres sterling par force de cheval, et les risques et la diminution de valeur peuvent équivaloir à une dépense annuelle de la cinquième partie du capital employé, ou à 10 liv. sterling par force de cheval. La dépense en combustible et en eau, par jour, ne sera pas de moins de 1 $\frac{1}{2}$ boisseau (57 kilogr.) de houille par force de cheval, et de 14 pieds cubes anglais (398 litr.) d'eau. Et en supposant que le prix de la houille soit de $\frac{1}{2}$ shelling le boisseau, et que l'eau et les frais pour la charger, ainsi que le combustible, se montent à 3 pences, la dépense annuelle sera de 15 livres sterling 12 shellings. Les remplacemens et les réparations, à 20 pour cent du capital employé, seront de 10 livres sterling, ce qui est la somme la plus faible à laquelle ces dépenses puissent être portées. Il faut un homme et un jeune garçon pour l'aider, pour conduire une machine de la force de six chevaux, à 6 shellings pour les deux, ou à 1 shelling par force de cheval, c'est 15 livres sterling et 12 shellings par an. Par conséquent la dépense totale annuelle pour une machine de la force d'un cheval serait de 51 livres sterling et 4 shellings (1280 fr.), ou de 158 farthings par jour. Cette force est égale à 3000 livr., ou à 1 $\frac{1}{3}$ tonneau par mille, pour la force de traction; ou, en déduisant le poids des chariots,

à 1 tonneau par mille par jour, et $144 \times 1 = 144$ tonneaux par mille sur les chariots; ce qui porte les frais de transport à $\frac{158}{144} = 1,1$ farthing (2,85 centimes) par mille, ou à 1 $\frac{1}{3}$ farthing (3,4 centimes) par mille, en y comprenant les bénéfices de l'entrepreneur, et ce qu'il en peut coûter de dépense extraordinaire sur une route en fer où l'on emploie des chariots à vapeur.

Il paraît, d'après ces calculs, que toutes les fois qu'un chemin ne s'étendra pas assez loin des mines de houille pour que le prix moyen du charbon d'une qualité égale au charbon de Newcastle, ne s'élève pas à plus de 6 pences (62 centimes) par boisseau, ou de 13 shellings et 5 pences (16 fr. 80 cent.) par tonneau, une machine locomotive sera de $\frac{3}{8}$ moins coûteuse que des chevaux. Mais on a supposé dans ces calculs qu'un boisseau et demi de charbon produit le même effet par jour que la force d'un cheval, et que par conséquent les machines sont supérieures à celles qu'on emploie maintenant : on a supposé de plus que l'excédant de vapeur sert à chauffer l'eau de la chaudière, et rend inutile l'emploi de chaudières établies sur les bords de la route pour cet usage (*).

(*) La houille nécessaire pour produire un effet utile

Lorsque la vapeur agit par expansion, on obtient plus d'effet avec la même quantité de combustible, mais il faut alors de plus grands cylindres.

---

de 144 tonneaux transportés à 1 mille (1609 mètres) se monte, suivant notre calcul, à 1 $\frac{1}{2}$ boisseau (57 kilogr.), c'est-à-dire à 0,395 kilogrammes par tonneau par mille. Et comme il a été fait quelques expériences à ce sujet, nous allons les comparer. Dans une expérience faite à la mine de houille de Killingworth, le 17 janvier 1825, 12 chariots chargés de 54 quintaux (2750 kilog. à peu près) chacun, ont fait 2 $\frac{1}{2}$ milles (4 kilom.) en 40 minutes, traînés par une machine à vapeur locomotive, qui consomma 4 pecks et demi de houille pour produire cet effet. Le peck de charbon de Newcastle est de 34 $\frac{1}{2}$ livres, mais nous supposerons que celui de l'expérience est le peck ordinaire, quart du boisseau, et pesant 21 livres (9 kilog. et demi). Alors la quantité de charbon employée sera de 94 $\frac{1}{2}$ livres (42,67 kilog.), et l'effet, ou 32,4 tonneaux conduits à 2 $\frac{1}{2}$ milles, est équivalent à 81 tonneaux transportés à 1 mille; ou bien il a fallu 1,17 livres (à peu près 5 hectogrammes) de houille pour transporter 1 tonneau à 1 mille. Il faut ajouter que la chaudière à vapeur était entretenue avec de l'eau chaude.

Dans une seconde expérience, 8 chariots contenant 21,6 tonneaux de houille furent traînés à 2 $\frac{1}{2}$ milles en 36 minutes, avec 4 pecks de charbon, ce qui revient à 1 tonneau transporté à 1 mille par 1,55 livres (7 hectogrammes) de charbon.

La dépense annuelle pour faire marcher des chariots au moyen de machines à basse pression,

---

Dans une troisième expérience, 6 chariots contenant 16,2 tonneaux de houille furent traînés à 2 $\frac{1}{2}$ milles en 32 minutes, avec 5 pecks (47,5 kilogr.) de houille, ce qui revient à 1 tonneau transporté à 1 mille par 2,6 livr. de charbon (1,18 kilog.)

La moyenne entre ces trois expériences est 1,74 livres de houille. Il paraît évident que l'irrégularité a été occasionée par l'état de la vapeur, qui se trouvait très forte au commencement des expériences, et affaiblie lorsqu'on a fait les dernières. Les chariots montaient pendant 1 $\frac{1}{4}$ mille sur un chemin dont la pente était de 1 partie sur 792, et descendaient ensuite le même plan; ainsi, l'effet moyen devait être à peu près le même que si le chemin avait été de niveau.

Le résultat de ces expériences nous a conduits à établir dans le cours de ce Traité, que sur les chemins en fer de Newcastle, il fallait environ 3 boisseaux de houille (115 kil.) pour produire l'effet que dans le calcul des machines à vapeur on nomme la force d'un cheval : une expérience plus récente prouve qu'on peut le produire avec moins. En effet, il résulte d'une expérience faite à Killingworth, le 22 janvier 1825, que 12 chariots, contenant 33 $\frac{3}{4}$ tonneaux de houille, ont été conduits à 9 $\frac{1}{2}$ milles par un chariot à vapeur qui consomma, pour produire cet effet, 360 livres (164 kilogr.) de houille. Or, 33 $\frac{3}{4} \times 9{,}5 = 320 \frac{5}{8}$ tonneaux transportés à 1 mille, et $\frac{360}{320 \frac{5}{8}} = 1 \frac{1}{8}$

qui mettent en mouvement des chaînes sans fin, doit consister dans :

1. L'intérêt du capital employé à la construction de la machine, des bâtimens où elle se place, des puits, des réservoirs, des pompes; à l'achat du terrain sur lequel ces constructions sont faites, des chaînes, des rouleaux, enfin de toutes les parties qui composent ce mécanisme.

2. La diminution de valeur à raison des dégradations et des assurances qu'il faut payer.

3. Les frais de réparation et de remplacemens.

4. Le combustible et l'eau.

---

livre par tonneau par mille, à très peu près, ce qui donne une différence de près de $\frac{1}{4}$ de livre par tonneau par mille, avec la proportion que nous avons donnée. La route et les machines avaient déjà servi pendant plusieurs années, à l'exception d'une petite partie de la route, qu'on a faite en fer forgé, sur laquelle la vitesse des chariots se trouvait augmentée. Mais comme un chemin à ornières de fer doit durer plusieurs années pour être utile au public, l'état dans lequel la route se trouvait peut être pris comme donnant un terme moyen assez juste; car à d'autres égards l'expérience était indubitablement faite pour montrer le résultat dans son jour le plus avantageux. Il aurait été plus convenable pour notre objet d'avoir l'état de la houille consommée pendant un mois, et celui de la quantité de houille conduite dans le même temps à une distance déterminée de la mine.

5. Les émolumens des employés.

6. Le bénéfice de l'entrepreneur.

Ce mode d'employer la force est évidemment limité au cas où les transports sont très considérables; et il doit être évalué par la dépense de toute l'étendue du chemin, de la même manière qu'on évalue la dépense pour le chemin même. On ne pourrait pas obtenir autrement un résultat exact; mais, sans en faire le calcul, on peut assurer que ce résultat sera, à très peu de chose près, égal à la cinquième partie de la dépense qu'exigera le chemin en fer lui-même.

Ainsi, quel que soit le tarif des droits qu'on jugera nécessaires pour couvrir la dépense du chemin, il faudra l'augmenter de $\frac{1}{8}$ pour les frais du moteur, lorsque la quantité d'objets qui paieront le droit sera équivalente à 428 tonneaux par jour, ou à 1 $\frac{1}{4}$ farthing par tonneau par mille.

Il nous reste encore une autre dépense à considérer, avant que nous ayons toutes les données pour établir ce qui doit être payé pour le transport des marchandises, c'est celle des voitures et des hommes qui les conduisent, soit qu'on emploie des machines locomotives, soit qu'on se serve de machines stationnaires.

Le capital employé en chariots sera, terme moyen, d'environ 10 livres sterling par tonneau,

et en portant les réparations et les remplacemens à 1 livre sterling par tonneau par an, la dépense annuelle sera d'environ 2 livres sterling par tonneau par an, ou de 7 farthings (18 centimes) par jour pour chaque tonneau, bénéfice compris.

Si l'on passe un homme par chariot ou par convoi de chariots portant 6 tonneaux, la dépense par jour, à 2 shellings 4 pences, sera

112 farthings.

La dépense en voitures,

$6 \times 7 = 42$ farthings.

Dépense totale par jour, 154 farthings, ou à peu près, ou 26 farthings par tonneau par jour.

Nous sommes maintenant en état de comparer les différentes espèces de moteurs et les frais de transport d'après les évaluations moyennes, ce qui nous conduira à montrer comment on peut arriver à des évaluations plus exactes quand on les fait pour quelque ligne particulière de route.

Frais de transport avec les chevaux.

Nous avons trouvé que la dépense pour un cheval et pour le conduire est de 216 farthings par jour, et que les frais pour un chariot chargé de 6 tonneaux sont de 42 farthings aussi par jour,

ce qui fait en tout 258 farthings; et la journée de travail étant de 18 milles lorsque la marche est de 3 milles par heure, et l'effet du moteur de 125 livres (57 kilog.), ce qui revient à $6 \times 18 = 108$ tonneaux transportés à 1 mille, et à $\frac{258}{108} = 2{,}4$ farthings (6,3 centimes) par tonneau par mille.

Nous avons vu que lorsque les transports s'élèvent à 428 tonneaux par jour, le droit à percevoir pour couvrir les frais de la route en fer doit être de 4 farthings (10,5 centimes) par tonneau par mille; donc la totalité des frais de transport sera, dans ce cas, de 6 farthings et 4 dixièmes par tonneau par mille (10,5 centimes par tonneau pour chaque kilomètre de chemin).

Si les transports n'étaient évalués qu'à 200 tonneaux par jour, les frais iraient à 10,4 farthings par tonneau par mille; mais s'ils s'élevaient à 856 tonneaux par jour, le droit, pour couvrir les frais du chemin en fer, ne serait plus que de 2 farthings, ou la dépense totale ne serait que de 4,4 farthings. Nous mettrons 5 farthings (13 centimes), parce qu'alors tout est sujet à s'user plus vite.

Le capital qu'il faudrait dépenser pour un canal sur lequel se ferait un commerce de 856

tonneaux par jour nécessiterait un droit de 1 farthing par tonneau par mille sur les transports; et le travail d'un cheval étant ici, par jour, d'environ 22 tonneaux transportés à 23 milles (*), ou de 506 tonneaux transportés à 1 mille, on a $\frac{216}{506} = 0,427$, ce qui donne 4,427 farthings par tonneau par mille, sans y comprendre les frais de l'entrteien des bateaux et des hommes qui les conduisent. On peut conclure de ces calculs que toutes les fois qu'on a moins de 1000 tonneaux par jour à transporter sur un canal, il en coûte plus par cette voie que par un chemin en fer, même lorsqu'on emploie des chevaux et que l'on va moins vite. Sur une grande route ordinaire, l'effet utile le plus considérable n'est pas, terme

(*) Sméaton établit que le travail d'un cheval qui traîne les bateaux d'un canal est de 22 tonneaux conduits avec une vitesse de 2 ½ par heure (voy. *Reports*, vol. I, pag. 146 et 168); et M. Bevan nous a appris que les chevaux du *Grand Junction Canal* font ordinairement 26 milles par jour, en tirant un bateau chargé de 24 tonneaux, et qu'ils avancent à raison de 2,45 milles par heure. Le bateau vide étant de près de 9 tonneaux, la masse totale mise en mouvement est d'environ 33 tonneaux. Le même M. Bevan a trouvé que la force moyenne de traction n'était que de 80 livres avoir du poids (36 kilogr.).

moyen, de plus de $\frac{3}{4}$ de tonneau conduits à 18 milles par un seul cheval en une journée, ou de 13,5 conduits à 1 mille. Et en supposant la dépense du cheval et de l'homme qui le conduit de 216 farthings, et les frais du chariot de 7 farthings, on a $\frac{223}{13,5} = 16$ farthings par tonneau par mille, pour les frais du moteur et de l'homme qui le dirige.

Quand le commerce sur ce chemin est de 206 tonneaux par jour, il faut ajouter 3 farthings pour droits, ce qui fait 19 $\frac{1}{2}$ farthings, ou très près de 5 pences (52 centimes) par tonneau par mille, ou presque le double des frais de transport sur un chemin en fer où le commerce serait le même.

Quand le commerce n'est que de 100 tonneaux par jour, les frais d'une voiture sont à peu près les mêmes sur le chemin en fer et sur la grande route; mais sur celle-ci on a la facilité de délivrer les marchandises à quelque point de la route que ce soit, ce qui ne peut pas se faire sur un chemin en fer.

Frais de transport avec les machines à vapeur locomotives.

Nous pensons que les voitures qui sont conduites par ce moyen ne doivent pas aller plus vite

qu'à raison de 6 milles par heure, ou de 60 milles par jour; et à ce taux les frais pour les chariots et ceux qui les conduisent seront de 26 farthings par tonneau pour 60 milles, ou de $\frac{26}{60} = 0{,}433$ farthings (1 centime) par tonneau par mille, qui, ajoutés à 1,333 farthing pour le chariot à vapeur, le combustible et les conducteurs, fait une dépense totale de 1,766 farthing par tonneau par mille (2,85 centimes par tonneau par kilomètre), ou à peu près les $\frac{3}{4}$ de la dépense avec des chevaux. Mais si les chevaux devaient marcher avec la même vitesse, les frais avec la machine à vapeur ne seraient plus que les $\frac{2}{7}$ de ceux qu'on ferait en employant des chevaux. Il faut y ajouter les droits à percevoir sur le chemin en fer; ils sont à peu près les mêmes, quel que soit le moteur qu'on emploie.

Frais de transport par les machines stationnaires.

Les dépenses avec cette espèce de moteur seront à peu de chose près les mêmes, à vitesse égale, qu'avec les machines locomotives. En suivant la même marche, nous trouvons qu'elles se montent à 1,683 farthing par tonneau par mille (2,71 centimes par tonneau par kilomètre).

Dans l'un et l'autre cas, quand les transports

sont de plus de 800 tonneaux par jour, la dépense totale en droits, en voitures et pour le moteur, est de moins de 1 *penny* par tonneau par mille (6,5 centimes par kilomètre), moins que les seuls droits à payer sur un canal pour la même quantité de commerce, quoique les bénéfices soient les mêmes dans les deux cas. Et à moins que ce ne soit dans un pays extrêmement favorable pour y construire un canal à peu de frais, un chemin en fer offrira toujours le moyen de transport le plus économique quand le commerce journalier sera au-dessous de 15 à 1600 tonneaux.

Et si l'on veut se rappeler que sur une route en fer les marchandises peuvent être transportées au moins deux fois plus vite que sur un canal, et sans augmentation de frais de transport, on ne pourra guère s'empêcher de penser avec nous qu'on ne doive que bien rarement regarder comme préférable l'ouverture d'un canal à la construction d'un chemin en fer. Si l'on avait appliqué aux canaux des modes d'évaluations semblables aux nôtres, les exemples d'entreprises sans avantages, pour ne pas dire ruineuses, n'auraient pas été si communs.

Ayant fait voir les dépenses relatives des différens moyens de transport pour les marchandises, et l'étendue de commerce à laquelle chaque mode

est applicable, nous allons examiner, non sans espoir d'être utile, quelle étendue de chemin en fer peut promettre des bénéfices probables. Quand une charge doit être transbordée d'un chariot dans un autre, on ne peut guère supposer que les frais de chaque changement seront de moins d'environ 3 pences (32 centimes) par tonneau. Si les marchandises consistent en houille ou en objets de cette nature, nous conseillons de les mettre dans des boîtes ou caisses semblables à celles qu'on emploie depuis quelque temps sur la *Wear* pour mesurer la houille; chaque boîte devant contenir la charge d'une charrette à un cheval, et faite de manière à pouvoir être conduite à sa destination par une de ces charrettes. Le transbordement se ferait alors très promptement au moyen d'une grue disposée pour cela, et la houille ou les autres objets n'éprouveraient aucun dommage.

Les frais de transport sur une route ordinaire étant de 5 *pences* (52 centimes) par tonneau par mille, et de 2 *pences* sur un chemin en fer, il en résulte évidemment qu'il n'y a aucun avantage sur une route en fer de 2 milles seulement de longueur, lorsque les marchandises doivent être rechargées pour être conduites à leurs destinations respectives; et les dépenses et les inconvéniens d'un pareil mode de transport rendraient

vraisemblablement une longueur de chemin en fer de 5 à 6 milles d'une utilité très médiocre pour le commerce général.

Comme les plans inclinés sont non-seulement un inconvénient, mais aussi un moyen dispendieux de franchir une hauteur ou de traverser un vallon, il est très important, dans la théorie des chemins en fer, de déterminer quel abaissement dans une montée peut compenser les frais d'une certaine quantité de terres creusées ou rapportées.

La perte en montant ou en descendant sur des plans inclinés tient à deux circonstances : la première est l'augmentation réelle de la longueur de la ligne à parcourir; la seconde est la perte de force à raison du frottement et de la surcharge; il y a aussi plus de frais de conduite.

Appelons f' la perte qui résulte de la surcharge, i l'angle d'inclinaison auquel le plan peut être réduit, l'angle d'inclinaison primitif étant h; enfin nommons F la résistance des chariots quand la charge totale est de $1\frac{1}{3}$ tonneau sur le chemin de niveau, c'est-à-dire quand la charge effective est de 1 tonneau.

Alors la force sur les ornières de niveau sera à la perte de force en tonneaux par mille, à la montée, et quand la longueur de la base de la montée est

de l fois 3 pieds anglais (91 centimètres), comme

$$1760 : \frac{l}{\cos h} :: f' \mathrm{F} \sin h : \frac{lf' \mathrm{F} \sin h}{1760 \cos h} = \frac{lf' \mathrm{F} \ \mathrm{tang}\ h}{1760}.$$

Et quand la descente est la même, la perte de force à la descente $= 0$. Par le même raisonnement on trouve que la perte de force sur l'inclinaison i est égale à $\frac{lf' \ \mathrm{tang}\ i}{1760}$. Par conséquent la diminution de perte par la réduction de l'inclinaison à un angle quelconque i, est......... $\frac{lf' \mathrm{F}}{1760}(\mathrm{tang}\ h - \mathrm{tang}\ i)$.

Si le produit annuel du transport d'un tonneau à un mille est représenté par a, alors la perte annuelle causée par la montée et par la descente sera $\frac{lf' \mathrm{F} a}{1760}(\mathrm{tang}\ h - \mathrm{tang}\ i)$.

Pour trouver la dépense annuelle occasionée par la plus grande longueur du chemin en fer, nommons E la dépense par mille et $\frac{\mathrm{E}}{p}$ la rente annuelle qui servira à rembourser le capital employé, alors $\frac{l\mathrm{E}}{880p}$ (sec. h — sec. i) = la valeur annuelle de l'augmentation dans la longueur du chemin, ce qui est égal à

$$\frac{l\mathrm{E}}{880p}\left(\frac{\cos i - \cos h}{\cos h \times \cos i}\right),$$

d'où l'on tire pour la perte totale annuelle

$$\frac{l}{880}\left[\tfrac{1}{2}f\mathrm{F}a\,(\text{tang}\,h - \text{tang}\,i) + \frac{\mathrm{E}}{p}\left(\frac{\cos i - \cos h}{\cos h \times \cos i}\right)\right].$$

Maintenant, pour qu'il n'y ait aucun excédant de dépense en creusant et en rapportant des terres, il faudra que l'intérêt des capitaux employés pour faire ces ouvrages ne surpasse pas la somme ci-dessus.

Les frais de remuement des terres s'évaluent en Angleterre par *yard* cube (l'yard est de 3 pieds anglais, ou de plus de 91 centimètres). Soit $b =$ la largeur en *yards*, c le prix du remuement d'un *yard* de terre en fractions de la livre, et n la base de la pente de chaque côté de la route quand sa hauteur est l'unité. l, dans l'équation precédente, est la moitié de la ligne de la base en *yards*.

La coupure sur chaque inclinaison sera composée d'un solide en forme de coin, et de deux pyramides triangulaires, et les deux coins solides contiendront en *yards* cubes bl^2 (tang h — tang i).

Et les quatre pyramides contiendront

$$\frac{4nl}{3}\left[l\,(\text{tang}\,h - \text{tang}\,i)^2\right] \text{ d'}\textit{yards}\text{ cubes.}$$

La somme des quantités par l'intérêt est

$$\frac{l^2c}{3p}\left[3b\,(\text{tang}\,h - \text{tang}\,i) + 4nl(\text{tang}\,h - \text{tang}\,i)^2\right].$$

Et pour qu'il n'y ait pas de perte en faisant des coupures ou en exhaussant le terrain, il faut que l'on ait

$$\frac{l^2c}{3p}\left[3b(\tang h - \tang i) + 4nl(\tang h - \tang i)^2\right]$$
$$= \frac{l}{880}\left[\frac{1}{2}f'Fa(\tang h - \tang i) + \frac{E}{p}\left(\frac{\cos i - \cos h}{\cos h \times \cos i}\right)\right].$$

Si l'on substitue d, épaisseur de la coupure au sommet, à $l(\tang h - \tang i)$ qui lui est égal, on aura

$$\frac{lc}{3p}\left(3bd + 4nd^2\right) = \frac{\frac{1}{2}f'Fad + \frac{lE}{p}\left(\frac{\cos i - \cos h}{\cos h \times \cos i}\right)}{880},$$

Si après qu'on a réduit l'inclinaison, le chemin en fer se trouve de niveau, alors $\cos i = 1$, et l'erreur que l'on pourra commettre en supposant que $\cos i$ ait cette valeur dans tous les cas, ne sera pas d'une grande importance. Et de cette manière on aura une équation dont l'inconnue se trouvera dégagée de termes qui la compliquent. On aura donc

$$d = \sqrt{\frac{E(1 - \cos h)}{1173cn\cos h} + \left(\frac{3b}{8n} - \frac{pf'Fa}{4963lcn}\right)^2} - \frac{3b}{8} + \frac{pf'Fa}{4963lcn}.$$

Quand $F = \frac{1}{144}$ de $1\frac{1}{3} = 108$, $f' = \frac{1}{2}$, $p = 25$,

$n=1$, $b=8$ *yards*, $E=2500$ liv. ster. $a=700$ liv. ster., et $c=\frac{1}{160}$ liv. st., on a

$$\sqrt{\frac{340(1-\cos h)}{\cos h}+\frac{(3l-1,3)^2}{l^2}}-\frac{3l-1,3}{l}=d,$$

pour la profondeur de la coupure.

Ou bien on a pour valeur assez approchée dans la pratique, quand la longueur de la pente est considérable (*)

$$\sqrt{\frac{340(1-\cos h)}{\cos h}+9}-3=d.$$

Dans cette équation $\cos h$ est le cosinus de l'angle de la pente naturelle du terrain, et d la profondeur de la coupure depuis le sommet, et comptée en yards.

Il est facile de juger par ces équations qu'il est beaucoup moins dispendieux de suivre à peu près les ondulations de la surface que de faire, soit de grandes coupures, soit des exhaussemens de terres au-delà de ces limites qu'il est facile de déterminer en une demi-heure, en appliquant ces

---

(*) L'équation générale peut aussi être réduite à

$$\sqrt{\frac{E(1-\cos h)}{1173\,cn\cos h}+\left(\frac{36}{8n}\right)^2}-\frac{36}{8n}.$$

équations au cas particulier que l'on aura à examiner. Nous avons mis des nombres, et montré la manière de réduire les équations au cas d'une route d'un prix ordinaire; en ajoutant quelques exemples, nous contribuerons peut-être à détruire ces idées extravagantes sur les mouvement de terres, soit pour aplanir des hauteurs, soit pour exhausser le sol, qui font employer les capitaux du pays en spéculations ruineuses. Des dépenses premières trop fortes rendent toute entreprise funeste à la fortune de celui qui l'a faite; elles créent des demandes temporaires qui ne peuvent que nuire au pays en diminuant la quantité du travail utile et permanent.

*Exemple I*er. Dans un cas où la ligne d'un chemin en fer traverse une élévation dont la pente naturelle fait avec l'horizon un angle de 5 degrés, on demande quelle profondeur de coupure au sommet, et quelle épaisseur d'exhaussement dans le fond du vallon n'augmentera pas les prix de transport sur ce chemin.

La table des sinus naturels donne pour le cosinus de 5 degrés, 0,99619; par conséquent,

$$\sqrt{\frac{340\,(1-0,99619)}{0,99619}}+9-3=0,2 \textit{ yards},$$

ou deux dixièmes de 3 pieds, ou $\frac{3}{5}$ de pied (18

centimètres), ce qui fait voir qu'il est plus économique d'employer une plus grande force que de diminuer la pente de plus de $\frac{3}{5}$ de pied.

Exemple II. Si la pente naturelle du terrain faisait un angle de 12°, alors cosinus 12°=0,97815, et

$$\sqrt{\frac{340\ (1 - 0,97815)}{0,97815}} + 9 - 3 = 1,06\ \textit{yards}.$$

Exemple III. Si la pente naturelle d'une colline est de 45°, le cosinus de 45°=0,7071, et

$$\sqrt{\frac{340\ (1 - 0,7071)}{0,7071}} + 9 - 3 = 9,2\ \textit{yards}$$

pour la quantité dont la colline peut être abaissée au sommet, ou dont on pourrait exhausser les terres au fond du vallon. Les coupures entraînent une augmentation considérable de dépense quand elles passent ces proportions qui sont indépendantes de la longueur de la coupure, parce que, dans les deux modes, le surplus de dépense est proportionnel à la longueur. Dans ces calculs, nous avons négligé de faire entrer la quantité plus grande de terrain nécessaire pour faire les coupures ou les exhaussemens, et nous avons compté $1\frac{1}{2}$ *penny* par *yard cube*, soit pour creuser, soit pour remblayer, ce qui porte à 3 *pences* par *yard* cube le

remuement des terres. Cette évaluation des prix a été suivie dans l'application de l'équation. Quand les frais du remuement des terres sont différens, il faut une plus ou moins grande profondeur de coupure, suivant que le prix est moindre ou plus élevé que celui sur lequel nous avons calculé.

Il est des cas où l'on peut éviter les pentes, et avoir un chemin de niveau en faisant un circuit. Pour connaître quelle longueur de route sera équivalente au passage direct de la pente, nous pouvons reprendre l'équation de la page 227, en faisant $l =$ à la longueur totale de l'inclinaison en milles; f' la perte de force sur les plans inclinés; F la force motrice par tonneau ajouté au poids de la voiture; $a =$ le produit annuel d'un mille de chemin (dans ce cas $\frac{E}{p}$ doit être égal à a); $h =$ l'angle d'inclinaison de la route sur la pente; et L$=$l'augmentation en milles de la longueur de la route, en suivant le circuit; alors

$$La = l\left[\tfrac{1}{2}f'Fa \text{ tang } h + a\left(\frac{1-\cos h}{\cos h}\right)\right],$$

ou

$$l\left[\tfrac{1}{2}f'F \text{ tang } h + \left(\frac{1-\cos h}{\cos h}\right)\right] = L.$$

Dans le cas où $F = \frac{1}{108}$, $f' = \frac{1}{2}$, $p = 25$ et

$a = 700$ liv. sterl, l'équation devient

$$l\left(\frac{\tang h}{432} + \frac{1 - \cos h}{\cos h}\right) = L.$$

Exemple. Dans une ligne de chemin dont la longueur de la base des ornières inclinées serait de 6 milles, et l'angle d'inclinaison de 12°, on demande de déterminer l'augmentation de longueur de la route, en faisant des détours pour conserver le niveau, qui rendrait égale la dépense des deux lignes.

Dans cet exemple, $L = 6$ et $h = 12°$. Ainsi,

$$6\left(\frac{0.212}{432} + \frac{1 - 0,97815}{0,97815}\right) = 0,137 \text{ de mille},$$

ou à peu près la septième partie d'un mille, ou environ $\frac{1}{44}$ de la distance. S'il était possible, avec les conditions données dans cet exemple, de faire une route de niveau qui ne dépassât pas cette augmentation dans la longueur du chemin, on devrait la préférer, pourvu qu'elle ne s'écartât pas trop de la ligne droite. D'autres cas peuvent se calculer d'une manière analogue.

Nous nous flattons d'avoir examiné quelques-uns des points les plus importans de la théorie de la construction des chemins en fer; et si dans nos recherches nous n'avons pas pu nous trouver d'accord

avec d'autres personnes qui ont traité le même sujet, soit dans l'évaluation des frais de transport, soit pour la vitesse avec laquelle ces transports s'exécutent, nous partageons du moins l'opinion qui leur fait regarder les chemins en fer comme une branche importante du système des transports par terre; branche que l'accroissement du commerce ne peut manquer d'étendre plus ou moins promptement dans ce pays.

Il n'est que trop vrai, sans doute, que l'adoption d'une amélioration nouvelle, quelque utile qu'elle soit, est toujours accompagnée de pertes et d'inconvéniens pour ceux qui ont un intérêt dans les méthodes que l'on suivait auparavant; mais quoiqu'on doive regretter que ce mal accompagne nécessairement toutes les nouvelles découvertes, il serait absurde de vouloir, à cause de l'inconvénient, retarder l'adoption de tout perfectionnement dont le pays doit retirer un avantage réel. Cet esprit qui rejette toute espèce d'amélioration, par suite de motifs intéressés, ne devrait pas exister chez un peuple civilisé, et surtout il ne devrait jamais être protégé. Les encouragemens sont dus bien plutôt à ceux que leur intérêt personnel porte à augmenter le bien-être général.

CHAPITRE IX.

Table de la puissance de la vapeur dans les machines à haute pression.— Table de la puissance de la vapeur dans les machines à condensateur. — Table de la quantité de houille équivalente à la force d'un cheval dans les machines à haute pression et dans celles à condensateur.—Table de l'effet d'une force donnée sur un canal, sur un chemin en fer, sur une route ordinaire. — Table de la plus grande quantité de travail que puisse faire par jour un cheval d'une force moyenne sur les canaux, les chemins en fer, les routes ordinaires.— Table de la force et du poids des barres qui forment les ornières des chemins en fer. — Table du poids et du volume de diverses marchandises.

TABLE I.

Maximum de puissance de 1 décalitre d'eau réduite en vapeur dans les machines à vapeur à haute pression.

Température de la vapeur, therm. de Réaumur.	Force totale de la vapeur en centim. de mercure.	Force de la vapeur en kilogr., par centimèt. carrés au-dessus de la pression atmosphér.	Maximum de force mécanique de la vapeur d'un décalitre d'eau, en kilog. élevés à un mèt.		Proportion du coup de piston pour obtenir le maximum de dilatation de la vapeur.	Grammes de houille de la meilleure qualité qui peuvent convertir un décalitre d'eau en vapeur.
			A pression entière.	Par expansion.		
	Centim.	*Kilogr.*	*Kilogr.*	*Kilogr.*		*Grammes.*
88°55	88,9	0,175	Négative	Négative		1359
90	114,3	0,52	13900			1387
97,33	152,4	1,04	41700	47600	3/4	1418
108	228,6	2,08	72700	93200	7/12	1465
115,91	304,7	3,15	89500	122900	1/2	1497
122,53	381	4,18	99400	144500	9/20	1526
128,08	447	6,25	106500	160900	5/12	1549
138,49	609	7,33	118200	184500	3/8	1594

TABLE I. Cette table fait connaître toute la puissance de la vapeur d'un décalitre d'eau réduit en vapeur à différentes températures, par une machine à haute pression. La force est évaluée en kilogrammes élevés à 1 mètre de hauteur. La sixième colonne indique la proportion entre la longueur de la course du piston travaillant à pression entière, et celle qu'elle doit avoir quand

on veut que la vapeur se dilate au maximum de la force. Mais pour obtenir le plus grand effet utile, le piston doit fournir sa course entière pendant un temps plus long, et ce temps dépend de la quantité du frottement qui résulte des parties qu'on est obligé d'ajouter à la machine pour produire l'effet utile. Une machine à vapeur devrait être construite de manière que la communication entre le cylindre et la chaudière pût être arrêtée à chaque point de la course du piston, depuis celui donné dans la table pour la pression entière, et à la volonté de celui qui construit la machine, ou suivant le pression qu'elle éprouve. Cela serait préférable à l'usage ordinaire, qui consiste à rétrécir le passage de la vapeur au moyen de ce mécanisme grossier auquel on a donné, avec beaucoup de raison, le nom de soupape suffocante, *throttle walve*. On devrait bien se persuader que tout ce qui interrompt le passage de la vapeur dans le cylindre, perd sans utilité une partie de la force. C'est un fait contre lequel la théorie nous a appris que nous devions être en garde. (*Voy.* page 122.) Une soupape telle que celle dont nous conseillerions l'usage, est employée depuis quelque temps; elle a été, dit-on, inventée par M. Joshua Field. La force de la vapeur a été réduite, dans cette table, sur celle de

M. Taylor, qu'on trouve dans le 60e volume du *Philosophical magazine*, pag. 42. La force de la vapeur et la quantité de houille ont été déduites des règles. (Pag. 113 et 115.)

TABLE II.

Maximum de puissance de la vapeur d'un décalitre d'eau dans une machine à condensateur.

Température de la vapeur, therm. de Réaumur.	Force absolue de la vapeur en centimètr. de mercure.	Force de la vapeur en kilogr., par centim. carré au-dessus de la pression atmosphér.	Maximum de force mécanique de la vapeur d'un décalitre d'eau, en kilogr. élevés à un mèt.		Proportion du coup de piston pour obtenir le maximum de dilatation de la vapeur.	Grammes de houille de la meilleure qualité qui peuvent convertir un décalitre d'eau en vapeur.
			A pression entière.	Par expansion.		
	Centim.	Kilogr.	Kilogr.	Kilogr.		Grammes.
83°55	88,9	0,175	103700	163 00	4/11	1 59
90	114,3	0,52	108500	177000	15/44	1387
97,33	152,4	1,04	115200	192800	7/22	1418
108	228,6	2,08		213200	10/34	1465
115,91	304,7	3,15		223400	2/7	1497
122,53	381	4,18		234600	10/36	1526
128,08	447	6,25		240100	3/11	1549
138,49	609	7,33		251300	4/15	1594

Table II. Cette table donne, pour les machines à condensateur, la même chose que la précédente pour les machines à haute pression; et les mêmes remarques sur la manière dont la vapeur devrait être arrêtée, et sur le point convenable pour le

faire, conviennent à la machine à condensateur; il faut ajouter seulement qu'une machine à condensateur ne saurait opérer utilement, soit par expansion, soit autrement, si la quantité d'eau d'injection n'est pas proportionnée à la quantité de vapeur à condenser. La plupart des figures que nous avons vu décrire par ce petit instrument, qu'on nomme un indicateur, prouvent que quand la machine opère à pression entière, la pompe à injection ou la pompe à air, ne fournissent pas assez. Si la pompe à injection et le coup de piston de la pompe à air étaient parfaitement réguliers, les lignes qui indiquent la raréfaction dans le cylindre devraient coïncider.

Dans les deux espèces de machines, si la vapeur est interceptée à une partie de la course du piston, plus rapprochée du commencement que nous ne l'avons indiqué, il faudra que le piston soit tiré pendant une partie de sa course par le volant ou par tout autre mécanisme.

La table II a été calculée d'après les règles des pages 113 et 134.

Il est remarquable que notre table donne $\frac{4}{15}$ du coup, comme étant le véritable point où il faut arrêter le passage de la vapeur quand elle a la force de 138,9 degrés de Réaumur, ce qui répond à huit atmosphères. Par conséquent, dans une

machine de Woolf, le second cylindre doit, pour cette température, avoir 4 fois la capacité du premier. Nous croyons que c'est la pratique qui a appris que c'était la meilleure proportion; celles qui conviennent à d'autres températures se trouvent de la même manière par la table.

TABLE III.

Quantité de houille équivalente à la force d'un cheval, qu'on évalue ordinairement à 4500 kilogrammes élevés à un mètre par minute, dans les machines à haute pression, quand on obtient le plus grand effet possible.

Température de la vapeur, thermom. de Réaumur.	Force totale en centimètres de mercure.	Force en kilogr. par centim. carré, au-dessus de la pression atmosphérique.	Quantité de houille équivalente à la force d'un cheval.		Kilog. élevés à 1 mèt. représentant la force immédiate de la vapeur produite par 50 kil. de charb. de terre dans une machine à haute pres.	
			A pression entière.	Par expansion.	A pression entière.	Par expansion.
	Centimèt.	*Kilogr*	*Kilogr.*	*Kilogr.*	*Kilogr.*	*Kilogr.*
90°	114,3	0,52	218		501000	
97,33	152,4	1,04	74	65	1477000	1688000
108	228,6	2,08	44	35	2481000	3213000
115,91	304,7	3,15	37	27	3000000	4121000
122,53	381	4,18	33	23	3260000	4756200
128,08	447	6,25	32	21,8	3478000	5210000
138,49	609	7,33	29	18,8	3685000	5846000

TABLE III. Cette table a été formée, avec la table I, par la méthode suivie dans l'exemple de la page 116, pour calculer les quantités de charbon équivalentes à la journée d'un cheval, en supposant la force d'un cheval égale à 4500 kilogrammes élevés à 1 mètre par minute. Le nombre de kilogrammes élevés à 1 mètre de hauteur par 50 kilogr. de houille, a été tiré par proportion de la table I; c'est la puissance absolue de la machine. Pour avoir l'effet utile, il faudrait en déduire le frottement des parties qu'on est obligé d'ajouter pour produire cet effet.

TABLE IV.

Température de la vapeur, échelle de Réaumur.	Force totale en centimètres de mercure.	Force en kilogr. par centim. carré, au-dessus de la pression atmosphérique.	Quantité de houille équivalente à la force d'un cheval.		Kilogr. élevés à 1 mèt., représentant la force immédiate de la vapeur produite par 50 kil. de houille dans une machine à haute pression.	
			A pression entière.	Par expansion.	A pression entière.	Par expansion.
	Centimètr.		Kilogr.	Kilogr.	Kilogr.	Kilogr.
83,55	88,9	0,175	28,5	18,3	3810000	6009000
90	114,3	0,52	28,1	17,3	3885000	6390000
97,33	152,4	1,04	27,2	16,2	4066000	6808000
108	228,6	2,08		15,2		7262000
115,91	304,7	3,15		14,7		7443000
121,53	381	4,18		14,5		7698000
122,08	447	6,25		14,3		7752000
138,49	609	7,33		14,0		7897000

Table IV. Cette table est formée, avec la table II, de la même manière que la table III est formée avec la table I.

Remarques sur les tables III *et* IV. Les colonnes qui indiquent le nombre de kilogrammes qu'une machine devrait élever à 1 mètre en consommant 50 kilogrammes de houille, ont été ajoutées dans le but d'offrir une comparaison avec le résultat de la pratique actuelle. Maintenant on regarde comme un fait bien établi par une suite d'observations faites pendant plusieurs années consécutives, qu'une machine de Woolf, dans la mine de Wheal Abraham, élevait 44000000 livres d'eau à 1 pied anglais de hauteur, avec 84 livres avoir du poids de houille (*), ce qui équivaut à plus de 7936000 kilogrammes élevés à 1 mètre de hauteur, avec 50 kilogrammes de houille; et il résulte des relevés faits aux mines du pays de Cornouailles, que 1 boisseau de bonne houille de Newcastle ou de Swansea, pouvait faire élever de 24 à 32000000 de liv. avoir du poids d'eau à 1 pied anglais de hauteur, avec les machines à double effet de M. Watt, agissant plus ou moins par expansion; l'effet plus ou moins grand dépendant

(*) *Millington's natural and experimental Philosophy*, page 346.

de l'état de la machine, de ses dimensions, de la vitesse de son action et de la qualité de la houille (*). Le terme moyen, 28 millions de liv. élevées à 1 pied, équivaut à 4347000 kilogrammes élevés à 1 mètre avec 50 kilogrammes de houille.

Nous citerons encore les résultats du travail moyen de vingt-deux machines à vapeur suivant le système de Watt, et de cinquante machines suivant celui de Woolf, pendant les six premiers mois de 1818, déduits des rapports de MM. Lean, lesquels donnent mois par mois la quantité de livres avoir du poids d'eau élevées à 1 pied anglais de hauteur par 1 boisseau de houille du poids de 84 livres (38 kilogrammes).

Nombre moyen de kilogrammes d'eau élevés à 1 mètre de hauteur avec 50 kilogrammes de houille.

De vingt-deux à vingt-cinq machines de Watt ont élevé la quantité moyenne de 4135000 kilogrammes.

Cinq machines de Woolf ont élevé la quantité moyenne de 6418000 kilogrammes.

(*) *Watt's notes on Robison meck. Phylosophy*, pag. 643.

Ces nombres sont plus faibles que la puissance immédiate des machines, à cause du frottement et de la perte d'effet résultant du jeu des pompes; de sorte qu'en les comparant avec notre table, on se convaincra que nos calculs ont été faits sur des données fixes et exactes, et qu'ils seront trouvés justes dans la pratique. Nous savons par notre propre expérience qu'un pied cube anglais d'eau (28,314 litres) peut être converti en vapeur avec 7 livres avoir du poids (3,174 kilogr.) de houille de Newcastle; mais nous savons aussi quelle attention il faut avoir pour produire cet effet; c'est pourquoi nous avons supposé qu'il n'est produit que par 8,4 livres (3,8 kilogr.). Notre objet est de montrer ce qu'on peut atteindre et ce qu'on devrait atteindre dans la pratique.

TABLE V,

Montrant l'effet d'une force de traction de 50 kilogrammes, à différentes vitesses, sur un canal, un chemin en fer et une route ordinaire.

VITESSE.		Charge mue par une force de traction de 50 kilogrammes.					
		Sur un canal.		Sur un chemin en fer de niveau.		Sur une route ordinaire de niveau.*	
Kilomèt. par heure.	Mètres par seconde.	Masse totale mue.	Effet utile	Masse totale mue.	Effet utile.	Masse totale mue.	Effet utile.
		Kilogr.	*Kilogr.*				
4	1,11	27719	19678	7200	5400	900	675
4,8	1,33	19250	13790	7200	5400	900	675
5,6	1,55	14142	10039	7200	5400	900	675
6,4	1,78	10828	7687	7200	5400	900	675
8	2,22	6928	4920	7200	5400	900	675
9,6	2,66	4812	3414	7200	5400	900	675
11,2	3,11	3536	2508	7200	5400	900	675
12,8	3,55	2645	1917	7200	5400	900	675
14,4	4	2138	1514	7200	5400	900	675
16	4,44	1732	1225	7200	5400	900	675
17,6	4,88	949	675	7200	5400	900	675

Table v. Cette table fait voir quelle quantité d'effet peut être produite par une même force de traction, à différentes vitesses, sur un canal, une route ordinaire et un chemin en fer. Les changemens de niveau, qui se font, dans les canaux, au moyen des écluses, peuvent être considérés comme équivalens aux montées et aux descentes

des chemins en fer et des grandes routes. La charge ajoutée au poids du bateau ou de la voiture qui la porte, forme la totalité de la masse mise en mouvement : la charge seule constitue l'effet utile. Sur les canaux, les masses mises en mouvement étant à très peu près en raison inverse du carré des vitesses, quand on connaît l'effet d'une force donnée à une vitesse aussi donnée, on peut trouver l'effet à toute autre vitesse en faisant cette proportion : le carré de cette seconde vitesse est au carré de la première, comme l'effet de la force donnée avec cette première vitesse est à l'effet de la même force avec la seconde vitesse. Ainsi, lorsqu'une force donnée peut, avec une vitesse de 4 kilomètres par heure, mettre en mouvement 27719 kilogrammes, on trouvera la masse que la même force mettrait en mouvement avec une vitesse de 4,8 kilomètres par heure, en faisant cette proportion :

$$4{,}8^2 : 4^2 \text{ ou } 23{,}04 : 16 :: 27719 : 19249{,}3.$$

La force de traction, sur un canal, varie comme le carré de la vitesse; mais la puissance mécanique pour mettre le bateau en mouvement augmente comme le cube de la vitesse. Sur un chemin en fer et sur une route ordinaire, la force

de traction est constante, mais la puissance mécanique nécessaire pour mettre la voiture en mouvement augmente dans le rapport de la vitesse.

On voit par cette table que dès que la vitesse est de 8 kilomètres par heure, il faut moins de force pour obtenir le même effet sur un chemin en fer que sur un canal. Nous avons porté la table jusqu'à 13,6 kilomètres de vitesse par heure, pour faire voir à quel degré de vitesse l'effet sur un canal n'est plus qu'égal à celui d'une route ordinaire. En comparant la puissance des bateaux à vapeur avec la quantité de tonneaux qu'ils peuvent porter, on pourra s'assurer que la loi suivant laquelle nous avons fait décroître la puissance, à mesure que la vitesse croissait, ne s'éloigne que fort peu de la vérité. Nous savons de plus que dans un canal étroit la résistance augmente dans un rapport plus rapide que le carré de la vitesse; mais nous n'avons pas, pour le moment, le temps de nous occuper de cet objet.

D'autres auteurs ont publié des tables de la même espèce que celle-ci. Celles de M. M***, auteur d'une suite d'essais sur le même sujet, qui ont été d'abord insérés dans le *Scotsman*, s'accordent à peu près avec la mienne sur la quantité d'effet utile produit sur les canaux ; mais nous différons

pour l'effet produit sur les chemins en fer; ses calculs sont plus en leur faveur. Notre table diffère considérablement de celle de M. Sylvester. Autant il a exagéré l'effet sur les chemins en fer et les routes ordinaires, autant il a porté trop bas l'effet sur les canaux. (*Voyez* son Rapport sur les chemins en fer, imprimé à Liverpool en 1825.)

TABLE VI.

Cette table fait connaître le maximum de travail qu'un cheval de force moyenne peut faire, à différentes vitesses, sur un canal, sur un chemin en fer et sur une route ordinaire.

VITESSE en kilomètr. par heure.	DURÉE de la journée de travail avec cette vitesse.	FORCE de traction en kilogr.	Effet utile de la journée d'un cheval, en tonneaux transportés à 1 kilomètre.		
			Sur un canal.	Sur un chem. en fer.	Sur une grande route.
Kilomètr.	*Heures.*	*Kilogr.*	*Tonneaux.*	*Tonneaux.*	*Tonneaux.*
4	11,5	37,75	845	187	23
4,8	8	37,75	388	147	19
5,6	5,9	37,75	249	131	16
6,4	4,5	37,75	166	115	14,5
8	2,9	37,75	85	91	11,5
9,6	2	37,75	49	77	9,6
11,2	1,5	37,75	31	66	8,1
12,8	1,125	37,75	21	58	7,2
14,4	0,9	37,75	14,6	51	6,4
16	0,75	37,75	10,7	46	5,8

Table vi. En revoyant la table de la page 103, nous avons reconnu qu'il y avait un maximum d'effet dépendant de la durée de la journée de travail. Cette table-ci est dressée sur ce maximum. On trouvera à la page suivante les calculs relatifs à la détermination de ce maximum. Quand les chevaux sont destinés à aller avec une très grande vitesse, il est très important de faire en sorte qu'en partant ils n'y arrivent que graduellement. Cette seule attention procurera aux propriétaires des chevaux une économie beaucoup plus grande qu'ils ne pensent. La meilleure manière de les nourrir et de les dresser pour le travail sans altérer leurs facultés mérite aussi d'être soigneusement étudiée.

Pour comparer notre table avec les résultats de la pratique dans les grandes vitesses, il est nécessaire de connaître la totalité de la masse mise en mouvement: cette masse est d'un tiers plus considérable que l'effet utile indiqué par la table. Maintenant le chemin que font par heure quelques-unes des voitures qui vont avec une très grande vitesse, est de 10 milles (16 kilomètr.) par heure, et la vitesse moyenne des voitures de relais est de 9 milles (14,4 kilom.) par heure; et une de ces voitures, conduite par quatre chevaux, peut être évaluée, avec les voyageurs, leur bagage et la charge, à un poids d'environ 3 tonneaux; par

conséquent le travail moyen de quatre chevaux de relais est équivalent à 27 tonneaux transportés à 1 mille (43 tonneaux transportés à 1 kilom.), ou $6\frac{3}{4}$ tonneaux transportés à 1 mille (10,75 tonneaux transportés à 1 kilom. par chaque cheval). La table indique, en mesures métriques, 5,8 tonneaux transportés à 1 kilom.; ajoutant un tiers à cette quantité, on a un peu plus de 7,7 tonneaux transportés à 1 kilom. pour le plus grand travail d'un cheval allant avec cette vitesse sur une route de niveau et en bon état. Il faut ôter de cette quantité la perte d'effet occasionée par les montées, les parties de routes moins bonnes, etc., ce qui donnera, pour le travail moyen d'un cheval de relais, allant comme vont aujourd'hui les diligences, à peu près le double du maximum indiqué par notre table. Les conséquences de cet excès de travail ne sont que trop connues.

D'après les observations de M. Bevan, les chevaux qui servent au *Grand Junction Canal*, transportent 617 tonneaux à 1 mille (987 tonneaux à 1 kilom.) avec une vitesse de 2,45 milles (3,93 kilomèt.) par heure, (*Voyez* page 221.)

Nous avons fait voir, page 98, que la force immédiate d'un cheval est exprimée par....... $250\,v\left(1-\frac{v}{V}\right)$. Et quand le poids du bateau ou

de la voiture est au poids de la charge comme $n : 1$, on a $\frac{250\,v\left(1-\frac{v}{V}\right)}{1+n}$ = la force effective. Et si l'on appelle d le nombre d'heures de travail d'une journée, la journée de travail sera....... $\frac{250\,dv\left(1-\frac{v}{V}\right)}{1+n}$, en livres avoir du poids transportées à 1 mille, et $250\left(1-\frac{v}{V}\right)$ sera égal à la force de traction en livres avoir du poids. Mais si la force était appliquée immédiatement, la valeur de V serait $\frac{14,7}{\sqrt{d}}$. Pour avoir la valeur de V quand les voitures seules sont mises en mouvement, on a $1 : \frac{1}{\sqrt{1+n}} :: \frac{14,7}{\sqrt{d}} : \frac{14,7}{\sqrt{d(1+n)}}$ = V. Et l'on a la journée de travail

$$\frac{250\,dv}{1+n}\left(1-\frac{v\sqrt{d(1+n)}}{14,7}\right).$$

Cette quantité est un maximum quand.... $\frac{96}{v^2\,1+n} = d$. Par conséquent, quand la vitesse est donnée, on a $\frac{96}{v^2(1+n)}$ = la durée de la journée de travail en heures, et $\frac{8000}{v(1+n)^2}$ = la jour-

née effective de travail, et

$$250\left(1 - \frac{9,8}{14,7}\right) = 83\tfrac{1}{3} \text{ livres avoir du poids};$$

mais on peut supposer que la valeur de n est toujours assez près de $\frac{1}{3}$ pour ne pas craindre d'erreur dans le résultat en employant cette fraction à sa place, et alors $\frac{72}{v^2} = d$, et $\frac{4500}{2}$ = la journée de travail en livres avoir du poids, ou à peu près $\frac{2}{v}$ tonneaux élevés à 1 mille, ce qui revient à $\frac{3,2}{v}$ transportés à 1 kilom. Cette dernière quantité, combinée avec les nombres de la table précédente, donne l'effet d'un cheval sur les canaux, les chemins en fer et les grandes routes.

TABLE VII.

Dimensions et poids des barres en fer coulé, pour les chemins à ornières étroites.

Distance entre les appuis, en mètres.	Épaisseur des barres en millimètres.	Poids total sur chaque roue des chariots, en tonneaux.								
		0,5	0,75	1	1,125	1,25	1,375	1,5	2	2,5
		Poids des barres.	Poids des barres.	Poids des barres.	Poids des barres.	Poids des barres.	Poids des barres.	Poids des barres.	Poids des barres.	Poids des barres.
Mètr.	*Milli.*	*Kilog.*	*Kilog.*	*Kilog.*	*Kilog.*	*Kilog.*	*Kilog.*	*Kilog.*	*Kilog*	*Kilog.*
0,609	82,5	10,76	7,14	9,52	10,54	11,90	13,15	14,29	19,04	23,80
0.914	101,5	8,71	13,15	17,56	19,73	21,77	24	26,19	33,92	43,65
1,066	111	11,11	16,66	22,22	24,94	27,89	30,60	32,33	43,44	55,55
1,219	117	13,38	19,84	27,75	30,15	33,56	36,96	40,13	53,51	66,89
1.370	123,5	15,87	23,80	31,74	35,83	39,90	43,75	47,61	63,40	79,36
1,523	130			37,18	41,84	46,71	51,19	55,78	74,37	92,97
1,675	136,4			42,97	48,52	53,97	58,40	64,51	85,94	107,48
1,828	142,8			48.98	55,33	69,48	67,12	73,47	97,96	122,45
2,133	152,4			60,93	68,90	76,64	85,15	91,49	121,99	152,49
2,438	165			75,50	84,70	95,23	104,31	113,26	151	188,32
2,742	174,6			89,79	101,13	113,37	124,71	145,69	179,59	224,48
3,047	184			105,21	118,36	131,52	145,12	157,78	210,42	263
		25,4	38	50,8	57	63,5	79,8	76,19	101,6	127
		Longueur en millimètres du bord supérieur de la barre.								

Ces dimensions et les poids correspondans sont donnés pour les cas ordinaires, mais pour des ouvrages importans la force doit être assez augmentée pour diminuer les dangers d'une rupture par suite de percussion. Nous avons dit (page 186) qu'on ferait bien d'augmenter cette force d'un

tiers, et nous avons conseillé de faire cette augmentation sur la largeur, afin de donner au chemin de fer plus de force latérale. La table, dans ce cas, servira encore pour trouver le poids et l'épaisseur des barres ; il faut pour cela supposer que la charge sur une roue est augmentée d'un tiers, et prendre dans la table le nombre qui donne la force correspondant à cette augmentation. Pour les voitures sur ressorts et pour les chariots à vapeur, on supposera que l'effort sur chaque roue n'est que les deux tiers de la charge effective qui pèse sur elle, ce qui donnera l'excès de force qui convient à ce cas.

TABLE VIII.

Dimensions et poids des barres en fer forgé pour les chemins à ornières étroites.

Distance entre les appuis, en mètre.	Épaisseur des barres, en millimètres.	Poids total sur chaque roue des chariots, en tonneaux.								
		0,5	0,75	1	1,125	1,250	1,375	1,5	2	2,5
		Poids des berres.	Poids des barres.	Poids des barres.	Poids des barres.	Poids des barres.	Poids des barres	Poids des barres.	Poids des barres.	Poids des barres.
		Kilog.	*Kilog.*	*Kilog.*	*Kilog.*	*Kilog.*	*Kilog.*	*Kilog.*	*Kilog.*	*Kilog.*
0,609	63,5	2,95	4,42	5,78	6,57	7,26	7,71	73,3	11,57	14,51
0,914	76,2	5,44	8,16	10,88	12,24	13,61	14,97	16,33	21,77	27,22
1,066	79,4	6,12	9,18	12,13	13,72	15,13	16,78	18,25	24,23	30,38
1,219	92,1	8,39	12,58	16,78	19,04	21,09	23,13	25,17	44,56	41,96
1,370	98,5	10,09	15,13	20,18	22,68	25,40	27,89	30,46	37,18	50,45
1,523	101,5			23,13	26,08	29,02	31,74	33,70	46,26	57,60
1,675	108,5			27,10	30,83	34,01	37,41	40,60	54,20	67,80
1,828	114,7			30,28	34,24	39,13	41,93	45,68	60,70	75,95
2,133	120,7			39,55	43,54	48,52	53,06	57,60	77,10	96,36
2.438	127			46,26	52,15	58,05	63,49	69,39	92,52	115 43
2,742	136,5			55,90	63,49	69,84	76,64	85,26	111,15	140,47
3,047	142,9			65,97	73,47	81,54	88,88	98,07	130,15	163,15
		25,4	38	50,8	57	68	79,8	76,19	101,16	127
		Largeur, en millimètres de la face supérieure de la barre.								

Table viii. On peut, pour un chemin en fer destiné à un service ordinaire, prendre, dans cette table, les dimensions et les poids du fer forgé; mais pour une route faite pour le service public, il faut ajouter un tiers à la charge qui pèse sur chaque roue, et chercher dans la table le nombre qui répond à la charge ainsi augmentée. Pour les routes dont les voitures les plus lourdes sont sur

ressorts ou sur pistons flottans, il ne faut prendre pour la charge que les deux tiers de la charge réelle, si c'est un chemin particulier; et si c'est un chemin public, la charge même qui pèsera sur chaque roue servira à trouver les dimensions et le poids des barres.

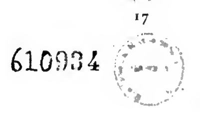
TABLE IX.

Table du poids qui occupe 1 mètre cube, et de l'espace occupé par 1000 kilogrammes de différentes substances.

SUBSTANCES.	Poids dans 1 mètre cube d'espace.	Espace occupé par 1000 kilogr.
	Kilogr.	*Décim. cubes.*
Plomb (fondu en saumons)...........	9072	110,23
Fer (fondu en saumons).............	5760	156,37
Marbre et pierre à chaux (en blocs).....	2752	363,37
Granit............................	2640	378,79
Pierre de Portland...................	2112	473,48
Terre à potier.......................	2080	480,77
Terre forte..........................	2016	496,04
Pierre de Bath (en blocs).............	1976	506,00
Gravier..............................	1742	574
Briques (ordinaires, sèches)...........	1488	672
Eau de rivière.......................	1000	1000
Houille..............................	912	1096
Chêne (sec)..........................	832	1201
Froment	768	1303
Orge.................................	608	1644
Sapin................................	608	1644
Foin (vieux, compacte)	128	7810

FIN.

1.



EXPLICATION

DES PLANCHES.

Fig. 1. Cette figure donne une idée de la nature d'un chemin en fer. On y voit un double rang d'ornières de l'espèce dite *ornières étroites*. Une portion de l'un des rangs est enlevée pour faire voir l'arrangement intérieur. Les barres de fer sur lesquelles doivent tourner les roues sont appuyées sur des blocs de pierre marqués *aa*: Le chemin sur lequel marchent les chevaux est fait avec du gravier ou avec des pierres cassées. (*Voy.* p. 1.)

Fig. 2. Représente la voiture à vapeur employée sur le chemin en fer de Hetton. A est la chaudière; BB les cylindres à vapeur. Le foyer est en dedans de la chaudière. F en indique l'entrée; C est le tuyau de cheminée; DD, pistons flottans qui portent la voiture sur l'essieu, et font l'office de ressorts en égalisant la pression sur les barres. Comme la force motrice n'est pas égale en même temps sur les roues des deux essieux, il est nécessaire de lier les essieux par une chaîne G, qui s'engrène dans des roues dentées sur les essieux. L'eau qui doit servir à l'entretien de la chaudière, et la houille en *b* pour le feu, sont portées sur un petit chariot nommé l'*allège*; I est le baril à l'eau, et *a* est un tuyau ou manche à eau

qui conduit l'eau à la pompe H, que fait aller la machine. WW sont des chariots de houille dont chacun est chargé de 53 quintaux (2680 kilogr.) de houille. Un seul chariot à vapeur conduit un train de 13 à 17 de ces chariots. Ils sont liés par des chaînes fort courtes CC. Les bielles de combinaison qui communiquent la force des pistons aux roues du chariot à vapeur sont attachées aux roues de manière qu'un piston est à la moitié de la longueur de sa course lorsque l'autre est au commencement de la sienne. (*Voy.* pag. 18 et 106.)

Fig. 3. Vue de profil d'une route à ornières étroites en fer coulé, dont les barres sont portées par les blocs de pierre DD. (*Voy.* page 17.)

Fig. 4. Plan de la barre qui montre les joints à entaille des bouts de barres, à l'endroit où ils se rencontrent sur le *siége* de fer qui les supporte.

Fig. 5. Coupe transversale de la barre en C, milieu de la longueur.

Fig. 6. Coupe transversale en B, passant dans le joint, le *siége* et le bloc de pierre qui sert d'appui. (*Voy.*, pour ces figures, page 17.)

Fig. 7. Coupe transversale des barres et de la route sur laquelle elles sont placées pour aller aux carrières d'ardoise de Penrhyn. Les barres *aa* ont au-dessus une pièce de fonte en queue d'aronde coulée sur elles, et qui répond à une rainure dans le siége *b* aussi en fonte, et qui passe sous le train des chevaux *c*.

Fig. 8. Est le plan de l'un des bouts du *siége* transversal; on y voit les rainures. (*Voy.* page 35.)

Fig. 9. Profil d'une partie de chemin à ornières étroites, construit en fer forgé. Ses barres sont supportées par

les *siéges* de fonte AAA, placés sur des blocs de pierre DDD écartés de 3 pieds (91 centim.). (*Voy*. pag. 17.)

Fig. 10. Coupe transversale en CB, milieu entre les blocs. (*Voyez* page 45.)

Fig. 11. Coupe transversale d'une autre forme, proposée pour les ornières en fer forgé. (*Voy*. pag. 45.)

Fig. 12. Profil d'un chemin à ornières étroites, d'épaisseur uniforme, et qui réunit la raideur à la force.

Fig. 13. Coupe en *ab* qui fait voir la forme de section de la barre et le *siége* qui la porte à l'endroit du joint.

Fig. 14. Coupe plus grande d'un chemin à ornières étroites, pour montrer l'arrangement des parties qui donne le plus grand degré de force. Si le rectangle *abcd* contient la même quantité de matière, la force de la barre dont la coupe a la forme ABDC est à la force dans la forme du rectangle comme $1\frac{3}{4}$: 1. La méthode ordinaire, qui consiste à réunir un plus grand volume de matière dans la partie qui est exposée à la tension, n'a jamais été adoptée pour les ornières; au contraire, on a généralement suivi de préférence l'erreur opposée.

Fig. 15, 16 et 17. Ces figures sont destinées à faire voir l'avantage des longues ornières. La portion d'ornière CD, *fig*. 16, est presque deux fois aussi forte que la barre courte AB, *fig*. 15. La figure 17 fait voir comment il convient de disposer les supports d'une ornière longue pour rendre ses parties à peu près d'une égale force.

Fig. 18. Coupe transversale d'une route à ornières plates, montrant la forme des ornières en BB, et la manière de les fixer aux blocs de pierre au moyen de clous enfoncés dans des tampons de bois placés dans les blocs CC.

A est le sentier que suit le cheval. On devrait donner de la courbure à l'angle intérieur que fait le rebord avec le fond de l'ornière, afin que les roues tendissent toujours à s'écarter de ce rebord.

Fig. 19. Fait voir la moitié d'une ornière plate ayant en-dessous un renfort C pour augmenter sa résistance. A est le rebord, et B le fond de l'ornière sur lequel tournent les roues.

Fig 20, 21 et 22. Ces figures font voir la méthode de M. Le Caan, pour fixer les ornières plates.

Fig. 23. Roue pour un chemin à ornières étroites, pour faire comprendre la manière dont se calcule sa force.

Fig. 24. Cette figure fait voir la forme que doivent avoir les bords des roues pour les chemins à ornières étroites quand on veut qu'elles puissent tourner sans être retenues par le frottement de leurs rebords.

Fig. 25. Montre la manière de disposer la matière des rais pour les rendre le plus forts possible, sans qu'ils soient difficiles à mouler.

Fig. 26. Cette figure montre comment on peut faire un chariot à huit roues, de manière à ce que l'effort de chaque roue sur les barres d'un chemin en fer soit égal. Le corps du chariot est placé sur les assemblages des roues en AA, et y est joint par un essieu sur lequel tournent les assemblages quand, par suite de quelque inégalité, les essieux des roues ne sont pas dans le même plan.

Fig. 27. Cette figure montre l'effort qui a lieu sur l'essieu le plus bas d'un chariot roulant sur un plan incliné; G est le centre de gravité de la charge, et GC la direction de l'effort. Si le centre de gravité était élevé jusqu'en *g*, tout l'effort serait porté sur l'essieu le plus bas.

Fig. 28. Quand un chariot est tiré par un cheval, le cheval tire avec le plus d'avantage lorsque la ligne de traction BC est presque perpendiculaire à son épaule; et c'est ce qui peut se faire en attachant les traits à quelque point B au-dessous du niveau de l'essieu : si les roues sont trop élevées pour obtenir cette direction sans employer cet expédient, la meilleure direction relativement au frottement du chariot est quand la ligne se trouve au-dessus du niveau de l'essieu, comme *bc*.

Fig. 29. Garde pour retenir la roue à sa place, dans le cas où l'esse serait cassée ou qu'elle se perdrait. A est la rainure dans le moyeu; la garde C y est retenue par la boule B. Le collet C de la garde ne doit pas toucher les côtés ou le fond de la rainure quand la roue est retenue à sa place par l'esse. D est une planche pour garantir contre la poussière.

Fig. 30. Dessin qui sert à expliquer la théorie du *ralentisseur*, ou du mécanisme qui sert à ralentir le mouvement des roues.

Fig. 31. *Ralentisseur*, ou mécanique pour arrêter ou retarder la vitesse des voitures à la descente sur un chemin en fer. Au moyen du levier F, qui tourne sur le centre E, les pièces de bois *aa* sont pressées contre la roue, ou en sont écartées. Une pièce G sert à tenir le levier au degré de pression convenable. Le levier et la manivelle sont supposés placés au milieu de la largeur de la voiture, et agir au moyen de l'axe C sur les pièces du *ralentisseur* des deux côtés de la voiture. Le mouvement de la roue doit être de A en B, comme l'indique la flèche.

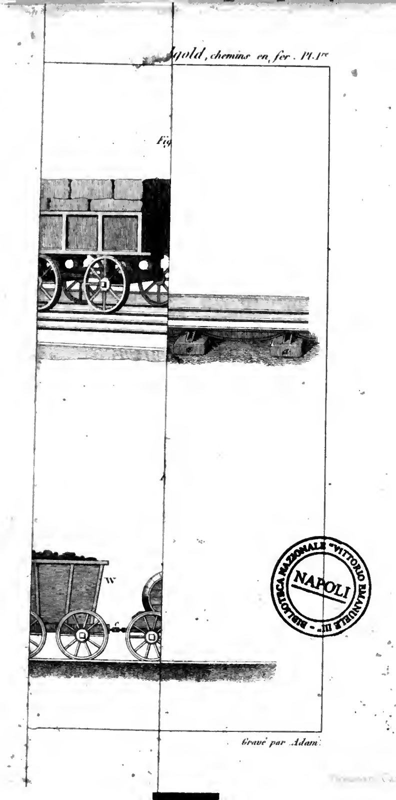
Fig. 32. Dessin qui montre le meilleure manière de ni-

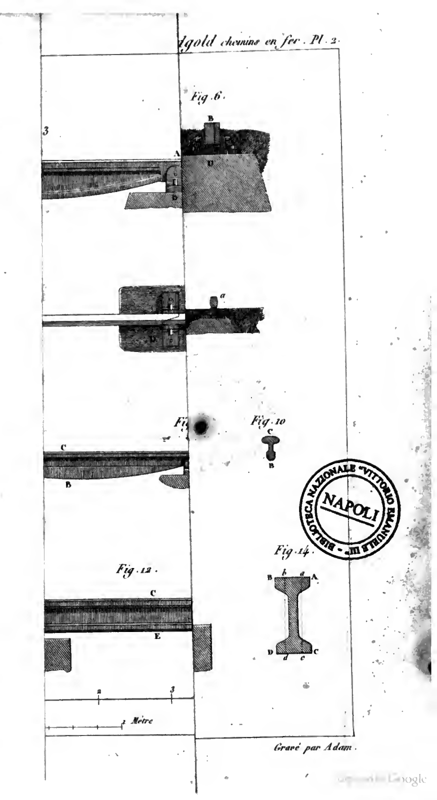
veler et de rapporter les résultats du nivellement sur un plan, pour déterminer la ligne exacte la mieux adaptée à un chemin en fer.

Fig. 33. Cette figure sert à démontrer la résistance des roues sur un plan incliné. (*Voy.* page 56.)

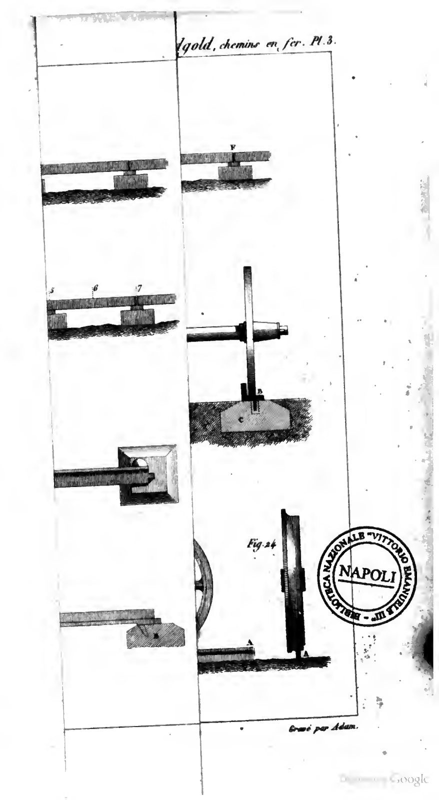
Fig 34 et 35. Servent à démontrer la résistance aux essieux des voitures. (*Voy.* pag. 66 et 71.)

FIN DE L'EXPLICATION DES PLANCHES.

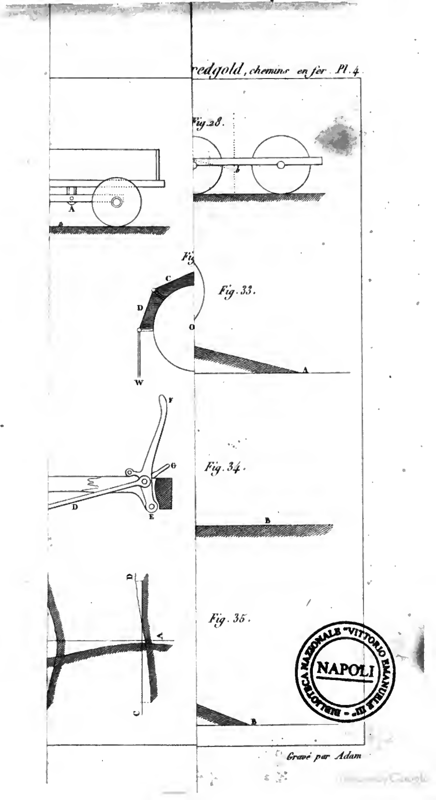

Agold, chemins en fer. Pl. 1re
Fig
W
Gravé par Adam.



Gravé par Adam.



Gravé par Adam.



Gravé par Adam



